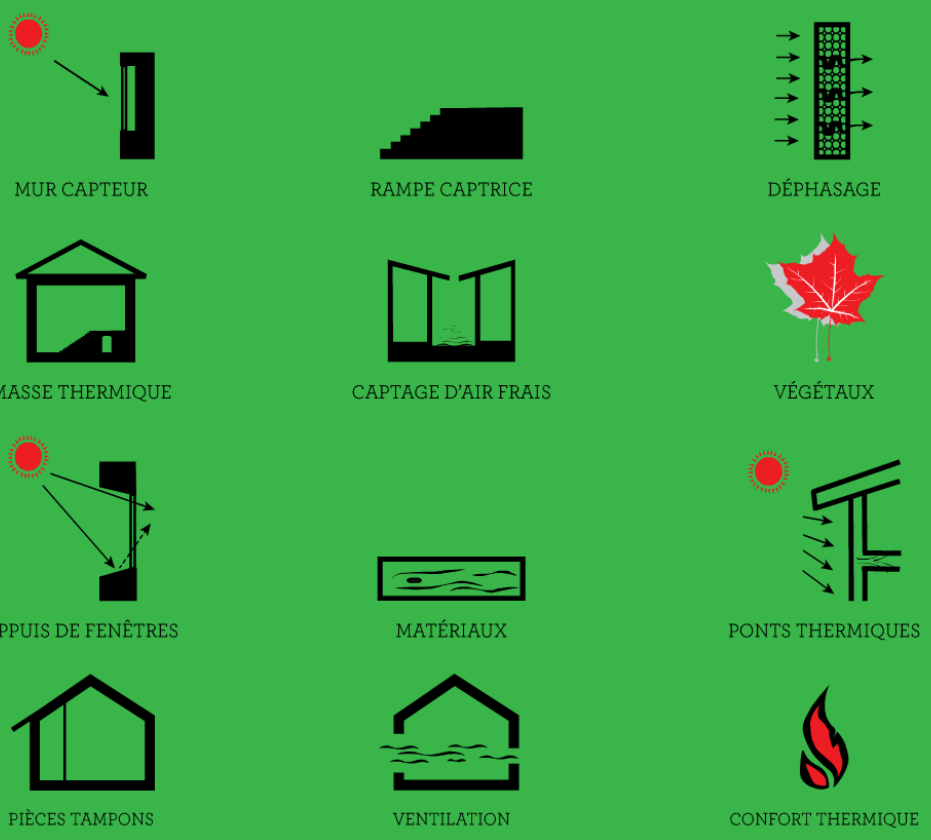
Christophe Olivier & Avryl Colleu

12 SOLUTIONS BIOCLIMATIQUES POUR L'HABITAT

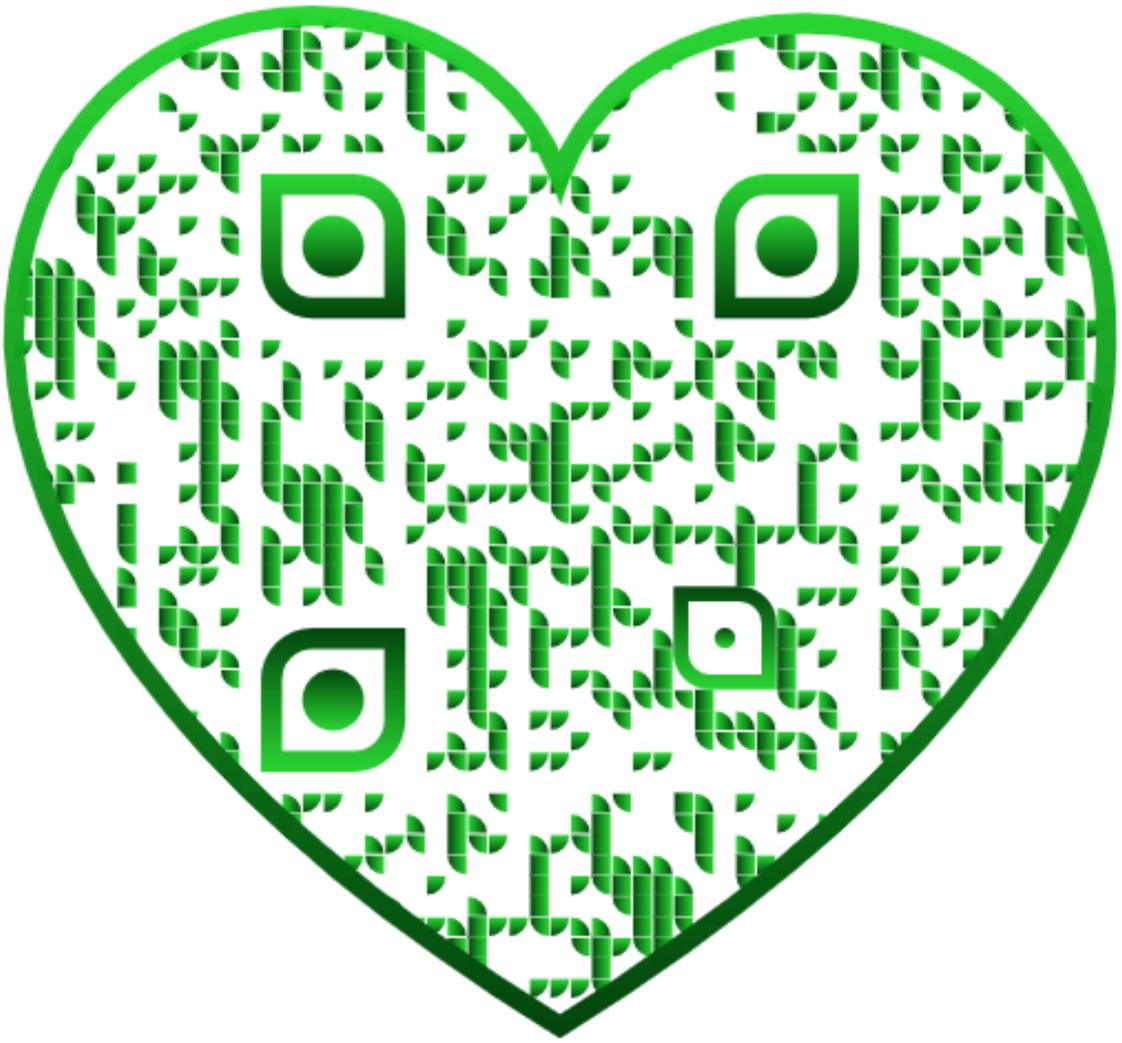
Construire ou rénover : climat et besoins énergétiques



EYROLLES

Copyright © 2016 Eyrolles.

SHOUT
SHARE
IT



Christophe Olivier & Avril Colleu

12 solutions bioclimatiques pour l'habitat

Construire ou rénover : climat et besoins énergétiques

Dans cette initiation imagée aux principes de la bioclimatique, les auteurs s'appuient sur l'histoire de l'homme et du climat pour aborder progressivement les principes de la thermique des bâtiments. Les architectes trouveront ici un cours de bioclimatique, les maîtres d'œuvre et les maîtres d'ouvrage des solutions et des tours de main. Les ingénieurs y puiseront avec plaisir matière à réflexion, les principes dont il est question étant adaptables à toutes les constructions.

En matière d'habitat et depuis l'Antiquité, les anciens avaient tiré de leur expérience un savoir-faire qui, tout en leur apportant plus de confort, était moins coûteux que les flambées de bois. Bien avant que cette science ne prenne le nom de bioclimatisme, un style architectural distinct s'était développé dans chaque région : il permettait de composer au mieux avec les apports climatiques locaux.

La Provence n'a pas fait exception : bien qu'ils fussent peu éduqués, ses anciens occupants, les Mestres, y mettaient en œuvre des principes simples dont on verra qu'ils se révèlent avantageusement applicables avec nos matériaux actuels.

Jusqu'en 1850, l'emploi des énergies fossiles n'étant pas encore généralisé, on se chauffait surtout au soleil d'hiver. Les bâtiments profitaient – ou se protégeaient – de tous les apports énergétiques qu'ils subissaient. Tel qu'on le construisait encore à l'époque, le foyer de l'habitation était structurellement confortable : il était peu éclairé et, les nuits d'hiver, on s'habillait suffisamment pour apprécier une température ambiante de 14 °C.

Et si les générateurs de chauffage actuels ne servaient qu'à chauffer les 5 °C manquants pour atteindre les 19 °C réglementaires ?

SOMMAIRE

I. Introduction à la bioclimatique : Histoire du bioclimatisme • La bioclimatique et les bâtiments passifs • Adaptation du bâti au climat provençal • La course du soleil • **II. Les solutions :** Chauffage : *Mur capteur – Rampe captrice* • Tempérer le logement : *Le déphasage – La masse thermique* • Apport de fraîcheur : *Captage d'air frais – Les végétaux* • Conception des parois : *Appuis de fenêtre – Matériaux* • Économiser l'énergie : *Ponts thermiques – Les pièces tampons* • Confort thermique : *La ventilation – Réguler l'humidité* • Le vent • **III. Mise en œuvre des procédés bioclimatiques aujourd'hui :** Rénovation • Autoconstruction • **Annexes :** Les parois • Les antisèches • Le climat du marquisat de Provence

Formé très jeune à ce que l'on appelle aujourd'hui l'énergétique des bâtiments, autoconstructeur en Afrique équatoriale, au Mexique puis en Provence, **Christophe Olivier** dirige un bureau d'études en bioclimatique à Avignon : *Renouveau Thermique*. Il travaille principalement en tant que conseiller en maîtrise d'ouvrage pour l'habitat ancien, et comme conseil auprès d'architectes pour les bâtiments neufs. Il nourrit aussi une passion pour l'histoire du bioclimatisme au cours de l'Holocène. Il construit actuellement une maison bioclimatique à énergie positive dans le Gard.

Architecte HMONP, **Avryl Colleu** s'est spécialisée dans l'écologie industrielle, la bioclimatique et l'énergie du bâtiment, au contact de spécialistes des énergies renouvelables. En s'entourant d'experts, elle exerce une veille pour le compte de grands organismes publics ; elle travaille par exemple sur la question de la récupération des calories émises par les *data centers* pour alimenter des logements et faire de l'économie circulaire. Organisatrice d'événements touchant à la défense de l'environnement et à l'innovation sociale, elle faisait partie de l'équipe d'organisation de *Place to B* pendant la COP 21. Architecte associée au sein de l'agence Platane&Ilic, elle y développe la conception et le montage de projets mêlant économie virtuelle et économie sociale et solidaire.

Étudiants et architectes, particuliers et artisans : tous ceux qui participent à la conception d'un bâtiment apprécieront cet ouvrage. Dans le domaine de la maison individuelle, il s'agira par exemple des propriétaires qui veulent faire construire et de ceux qui souhaitent rénover leur habitation en utilisant les énergies récurrentes du climat pour diminuer les besoins énergétiques des logements. Enfin, si l'on veut concevoir des constructions qui atteignent les faibles besoins énergétiques requis par un bâtiment à énergie positive (BEPOS, obligatoire en 2020), on sait qu'il faut aller dans ce sens.

www.editions-eyrolles.com

Copyright © 2016 Eyrolles.

Christophe Olivier & Avryl Colleu

12 solutions bioclimatiques pour l'habitat

Construire ou rénover : climat et besoins énergétiques

EYROLLES

Copyright © 2016 Eyrolles.

Groupe Eyrolles
61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05

www.editions-eyrolles.com

Sauf mentions contraires, les photos et schémas figurant dans cet ouvrage sont des auteurs.

Malgré le soin qu'ont apporté les auteurs et l'éditeur à l'identification des ayants droit des illustrations figurant dans l'ouvrage, il se peut que certaines images aient été incorrectement attribuées. L'éditeur remercie par avance les lecteurs qui voudront bien le lui signaler pour qu'il régularise les autorisations.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du Droit de Copie, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris.
© Groupe Eyrolles, 2016, ISBN : 978-2-212-14102-3

Copyright © 2016 Eyrolles.

Sommaire

AVANT-PROPOS 8

PARTIE 1

INTRODUCTION À LA BIOCLIMATIQUE 13

1| HISTOIRE DU BIOCLIMATISME 14

2| LA BIOCLIMATIQUE ET LES BÂTIMENTS PASSIFS 25

3| ADAPTATION DU BÂTI AU CLIMAT PROVENÇAL 29

4| LA COURSE DU SOLEIL 39

PARTIE 2

LES SOLUTIONS 45

5| CHAUFFAGE 46

6| TEMPÉRER LE LOGEMENT 59

7| APPORT DE FRAÎCHEUR 72

8| CONCEPTION DES PAROIS 86

9| ÉCONOMISER L'ÉNERGIE 103

10| CONFORT THERMIQUE 118

11| LE VENT 138

PARTIE 3

MISE EN ŒUVRE DES PROCÉDÉS BIOCLIMATIQUES AUJOURD'HUI 149

12| RÉNOVATION 150

13| AUTOCONSTRUCTION 171

CONCLUSION 188

ANNEXES

ANNEXE 1 : LES PAROIS 192

ANNEXE 2 : LES ANTISÈCHES 209

ANNEXE 3 : LE CLIMAT DU MARQUISAT DE PROVENCE 220

Copyright © 2016 Eyrolles.

Table des matières

AVANT-PROPOS 8

PARTIE 1

INTRODUCTION À LA BIOCLIMATIQUE 13

1| HISTOIRE DU BIOCLIMATISME 14
1. ADAPTATION DES PEUPLES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE 14
2. QUI A PRATIQUÉ LE BIOCLIMATISME ? 20
3. AUJOURD'HUI SE PRÉSENTENT DE NOUVELLES OPTIONS 22
4. ÉCHANGES DE CHALEUR 23

2| LA BIOCLIMATIQUE ET LES BÂTIMENTS PASSIFS 25
1. LE CLIMAT 29

3| ADAPTATION DU BÂTI AU CLIMAT PROVENÇAL 29
2. GÉNOISES 31
3. LES VÉGÉTAUX DANS L'ADAPTATION DU BÂTI AU CLIMAT 34
4. UNE CARACTÉRISTIQUE DU CLIMAT PROVENÇAL : LA ROSÉE 36

4| LA COURSE DU SOLEIL 39
1. QUELQUES COROLLAIRES ERRONÉS 40
2. LA COURSE DU SOLEIL 41

PARTIE 2

LES SOLUTIONS 45

5| CHAUFFAGE 46
SOLUTION BIOCLIMATIQUE 1 : MUR CAPTEUR 46
1. LE GÉNÉRALIFE 46
2. LE MUR CAPTEUR CONTEMPORAIN 50
SOLUTION BIOCLIMATIQUE 2 : RAMPE CAPTRICE 52
1. L'HISTOIRE DE LA RAMPE CAPTRICE 52
2. LA CURE DU BÉTON 56
3. LE MORTIER DE CHAUX 58

Copyright © 2016 Eyrolles.

6| TEMPÉRER LE LOGEMENT 59
SOLUTION BIOCLIMATIQUE 3 : LE DÉPHASAGE 59
1. COMMENT ISOLER SA MAISON EN BBC 59
2. CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DE LA PIERRE 61
3. EN PROVENCE 62
SOLUTION BIOCLIMATIQUE 4 : LA MASSE THERMIQUE 65
1. INERTIE THERMIQUE 65
2. LES CARACTÉRISTIQUES THERMIQUES DES MATÉRIAUX 68

7| APPORT DE FRAÎCHEUR 72
SOLUTION BIOCLIMATIQUE 5 : CAPTAGE D'AIR FRAIS 72
1. LES ARCHITECTES ROMAINS 72
2. L'ATRIUM 73
3. L'ATRIUM D'AUJOURD'HUI 75
4. LE RAFRAÎCHISSEMENT PASSIF 76
SOLUTION BIOCLIMATIQUE 6 : LES VÉGÉTAUX 79
1. ALBÉDO 79
2. LE FEUILLAGE 81
3. LA VIGNE VIERGE 84

8| CONCEPTION DES PAROIS 86
SOLUTION BIOCLIMATIQUE 7 : APPUIS DE FENÊTRE 86
1. TABLEAU DE FENÊTRE INCLINÉ 86
2. L'EFFET TUYÈRE 87
3. RENOUVELLEMENT D'AIR 89
SOLUTION BIOCLIMATIQUE 8 : MATÉRIAUX 92
1. MATÉRIAUX MODERNES 92
2. MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION ANCIENS 97

9| ÉCONOMISER L'ÉNERGIE 103
SOLUTION BIOCLIMATIQUE 9 : PONTS THERMIQUES 103
1. LE PONT THERMIQUE LINÉIQUE DE LA DALLE DE PLANCHER 103
2. LES PONTS THERMIQUES PONCTUELS 105
3. PONT THERMIQUE LINÉIQUE NON STRUCTUREL 106
SOLUTION BIOCLIMATIQUE 10 : LES PIÈCES TAMPONS 107
1. SERRE 108
2. LES PIÈCES OUVERTES 111
3. PIÈCES TAMPONS D'AUJOURD'HUI 114

Copyright © 2016 Eyrolles.

10| CONFORT THERMIQUE 118
SOLUTION BIOCLIMATIQUE 11 : LA VENTILATION 118
1. VENTILATION DOUBLE FLUX 119
2. EFFET TUYÈRE 121
3. CHANGEMENT DE PHASE 122
4. CLIMATISATION 123
5. LE PLÂTRE 125
SOLUTION BIOCLIMATIQUE 12 : RÉGULER L'HUMIDITÉ 128
1. LE CONFORT DU CORPS HUMAIN 128
2. LA VAPEUR D'EAU ÉMISE 133

11| LE VENT 138
1. STRATÉGIE D'ÉVITEMENT 138
2. FRISES SUR FAÎTIÈRES 140
3. LE VENT ARRACHE ? 142
4. FENÊTRE NORD 145

PARTIE 3

MISE EN ŒUVRE DES PROCÉDÉS BIOCLIMATIQUES AUJOURD'HUI 149

12| RÉNOVATION 150
1. QUEL TYPE D'ISOLATION CHOISIR ? 150
2. UNE MAISON DE CAMPAGNE 153
3. HABITAT INTERMITTENT NON UTILISÉ EN HIVER (CAS 1) 154
3. HABITAT INTERMITTENT OCCUPÉ EN HIVER (CAS 2) : ISOLATION PAR L'INTÉRIEUR 156
4. HABITAT PERMANENT EN BORD DE MER (CAS 3) : ISOLATION DU SOUS-SOL 157
5. HABITAT PERMANENT À L'INTÉRIEUR DES TERRES (CAS 4) : ISOLATION PAR L'EXTÉRIEUR 160
6. UN CABANON DES CHAMPS 162
7. UNE MAISON DE VILLE 163
8. PAROIS ET RÉNOVATION 167
9. QUELQUES EXEMPLES 170

Copyright © 2016 Eyrolles.

13| AUTOCONSTRUCTION 171
1. LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE 171
2. AUTOCONCEPTION 172
3. L'INVERSION DE TEMPÉRATURE 172
4. L'ESPACE HABITÉ 174
5. LES CONTRAINTES CLIMATIQUES 175
6. CHANTIER 177
7. CHAUFFAGE 180
8. PRÉVOIR DES CAS EXTRÊMES 181
9. VALORISATION 183
10. LE COÛT 186

CONCLUSION 188
LA DÉMARCHE BIOCLIMATIQUE 188
L'AVENIR 189

ANNEXES

ANNEXE 1 : LES PAROIS 192
1. LA STRUCTURE 192
2. LES ISOLANTS 193
3. LOGICIELS DE SIMULATION THERMIQUE 203
4. ISOLATION : EXPÉRIENCES 203
5. MONOMUR : EXPÉRIENCES 205

ANNEXE 2 : LES ANTISÈCHES 209
1. EN ALTITUDE OU EN HAUTE LATITUDE 211
2. LE PUITS PROVENÇAL 213
3. APPRENDRE DES BÂTIMENTS ANCIENS DU VOISINAGE 215
4. RÉNOVATION DE BÂTISSES 217

ANNEXE 3 : LE CLIMAT DU MARQUISAT DE PROVENCE 221
1. LE CLIMAT MÉDITERRANÉEN 221
2. LA PROVENCE 222
3. LA « DOUCEUR MÉDITERRANÉENNE » 223
4. LES CIEUX CLAIRS 223
5. LES PLUIES CONCENTRÉES EN ORAGE 224
6. LES HIVERS RÉPUTÉS DOUX 226
7. L'AMPLITUDE THERMIQUE 226

Copyright © 2016 Eyrolles.

Avant-propos

« Ce qui mérite d'être fait mérite d'être bien fait. » Le premier humain qui a décidé d'investir ses efforts dans la construction d'un habitat permanent a certainement tenté de construire un logement agréable à vivre. Pourquoi en douter ?

Ce premier constructeur a vraisemblablement pris en compte les matériaux et les outils dont il disposait et, avant de lancer son chantier, a considéré le climat dont il voulait se protéger. Il a soigneusement choisi l'emplacement de sa construction et l'a orientée en fonction de la course du soleil ou du vent dominant.

La bioclimatique date de temps immémoriaux. Depuis, cette adaptation du vivant au climat (bioclimat) a progressé. Chaque fois que l'on a découvert une nouvelle parade, on l'a testée. Si elle se révélait meilleure dans la durée que ce que l'on connaissait, elle s'imposait. Puis, elle était répétée. C'est le mécanisme du cliquet : le mouvement peut aller vers l'avant, mais il ne revient jamais en arrière. Sur cette base empirique se sont construits les artisanats : le savoir-faire ancestral.

Sous chaque microclimat, les solutions constructives les mieux adaptées se sont imposées. Petit à petit, de grandes tendances architectoniques se sont dessinées. Région par région, des styles architecturaux typiques sont apparus.

En deux siècles, les matériaux ainsi que nos connaissances techniques ont considérablement évolué. Théoriquement, nos édifices actuels devraient donc être beaucoup plus performants que ceux des années 1800.

À la demande des architectes des bâtiments de France et d'associations du patrimoine, le Centre scientifique des techniques du bâtiment (CSTB) a réalisé une étude approfondie de centaines de constructions anciennes appartenant à l'État français. Pour ce faire, ses ingénieurs ont installé de nombreux capteurs à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments, sur les murs, dans les planchers et dans la toiture, qui ont fourni des téra-octets de données numériques. Ils ont étudié toutes ces informations sur des ordinateurs surpuissants. Dans l'esprit de ces scientifiques, il s'agissait de comprendre pourquoi on vivait relativement confortablement dans de vieilles bâtisses dépourvues de toute isolation. Ils ont été surpris par les résultats obtenus. Ils en ont tiré trois déductions intéressantes :

- les logiciels de simulation les plus perfectionnés ne peuvent calculer la résistance de ces parois qu'avec des taux d'erreur souvent supérieurs à 20 % ;
- la résistance thermique des parois n'est pas constante tout au long de l'année. Elle semble varier en fonction de l'humidité qui les habite ;

Copyright © 2016 Eyrolles.

- les constructions testées affichent une consommation moyenne de 160 kWh/m².an.

N'en déplaise aux modernistes, la conclusion a été sans appel : malgré toutes nos avancées technologiques, malgré toutes nos inventions, l'efficacité thermique des bâtiments n'a pas progressé entre 1800 et 1970 !

Les ingénieurs du CSTB ont équipé de capteurs électroniques toutes les pièces de ces vieilles bâtisses. La plupart des pièces de ces bâtiments historiques n'ont plus l'usage pour lequel elles avaient été conçues : or elles sont devenues mairies, musées, ministères ou autres administrations. Par exemple, tel prieuré comportait une étable accolée qui est devenue une salle d'exposition, pour laquelle on a créé une porte qui modifie les flux et échanges thermiques du bâtiment. Dans un mas provençal, les pièces d'habitation étaient protégées à l'ouest par une grange et au nord par un cellier, ceux-ci ont été transformés en salon cathédrale et en bureau paysager. On comprend aisément que si l'étude du CSTB a considéré toutes les pièces actuelles, il est vraisemblable que les pièces originellement destinées à l'habitation auraient obtenu de meilleures performances thermiques que la moyenne.

La révolution industrielle, la révolution technologique et la révolution informatique n'auraient-elles donc eu aucun impact positif sur la qualité thermique de nos constructions ? Certes, nos avancées scientifiques ont permis de construire beaucoup plus vite, mais pas mieux. Les maisons qui se construisaient en 2000 affichaient des consommations allant jusqu'à 400 kWh/m²/an. Elles étaient thermiquement deux fois moins efficaces que les vieilles bâtisses du XVIIIe siècle ! La théorie du cliquet n'est donc pas inexorable. De fait, la progression de notre « savoir-construire » a été cassée par les deux guerres mondiales.

La Première Guerre mondiale a décimé les artisans. Les charpentiers de seize à soixante ans furent mobilisés ! L'administration militaire se moqua éperdument du lien qui unissait un maître et son apprenti. On les envoya au front pour construire et réparer les tranchées. Le gaz moutarde en tua beaucoup, rongeant rapidement les bronches des plus âgés. La transmission des connaissances fut interrompue. Des siècles d'expérience se perdirent ainsi dans « la guerre massacrante ». La Faucheuse ne laissa que des jeunes, souvent éclopés. Les patrons charpentiers d'après 1918, ceux qui reconstruisirent la France, avaient rarement plus de trente ans. Les corps des survivants avaient beaucoup souffert. Le bâti fut moins dégradé que le niveau du savoir-faire. On répara beaucoup plus qu'on ne construisit entre les deux guerres.

Lorsque la Seconde Guerre mondiale se termina, on constata le désastre laissé par l'efficacité impitoyable des bombardements. Des villes entières avaient été rasées. De Hambourg il ne restait que la cathédrale, seule, miraculeusement intacte au milieu d'un océan de ruines.

La perte du savoir-faire et le défi de « la reconstruction » du pays frappèrent également les deux camps. Il fallut édifier. L'urgence était absolue. On chercha la solution qui permettrait d'aller le plus vite possible. On trouva.

Le ciment venait d'atteindre un degré technique inégalé. Il s'agissait clairement du meilleur liant dont on disposait dans le monde. Sa composition chimique acceptait les agrégats les plus divers. On savait en couler des tonnes en quelques heures. On pouvait le fabriquer à qualité constante. Sa courbe de dilatation ressemblait à celle de l'acier. Le béton avait été élu « roi des matériaux ». Sa mise en place demandait une main-d'œuvre peu qualifiée.

Le besoin était tel que, malgré ce matériau innovant, malgré les investissements colossaux, il

Copyright © 2016 Eyrolles.

fallut plus de vingt-cinq ans pour le satisfaire. La demande resta nettement plus forte que la production jusqu'à la fin des années 1960. En 1965, de nombreux couples parisiens vivaient encore chez leurs parents, faute de trouver un logement.

La priorité des années 1960 n'est plus d'actualité. Aujourd'hui, l'efficacité énergétique s'impose. Elle est écologique, mais surtout pragmatique. Les énergies fossiles constituent une ressource limitée dont l'utilisation participe au réchauffement climatique. Diminuer les besoins en énergie s'avère donc important pour notre avenir, individuel et collectif.

Depuis les années 1960, nous avons inventé une multitude de technologies et de produits très efficaces. Un chauffagiste de l'après-guerre n'aurait pas pu imaginer nos technologies actuelles. Les pompes à chaleur, isolants, doubles vitrages, systèmes thermodynamiques, panneaux solaires ou éoliennes s'imposent à grande vitesse.

Nous vivons les prémices d'un changement climatique, mais nous n'en avons pas l'expérience. Observons les peuples qui en ont déjà vécu un : leurs habitats se sont adaptés. Ils ont employé des techniques primaires. Beaucoup d'entre elles se sont révélées particulièrement efficaces, d'autres très bon marché. La plupart peuvent être adoptées par les architectes. Nos bureaux d'études utilisent des logiciels perfectionnés qui permettent de calculer l'efficacité de certaines d'entre elles.

Nous en connaissons déjà le résultat : malgré la grande avancée de nos connaissances, les vieilles maisons aux murs très épais… seraient thermiquement plus efficaces que les maisons avec fenêtres à double vitrage du catalogue d'un constructeur bien connu des années 2000 !

Mais comment faisaient nos ancêtres pour supporter les hivers sans isolant pour leurs parois ni chauffage performant ? Et en Provence, pourquoi les vieilles maisons semblent-elles si fraîches même durant les canicules ? Les réponses à ces deux questions sont multiples, mais peuvent se résumer en une seule : ils s'accommodaient du climat local.

Au Nord de l'Europe, les constructeurs calfeutraient les bâtiments entre des doubles parois avec de minuscules fenêtres. En Provence, toutes les façades étaient en pierre et presque aveugles, sauf celles donnant sur le sud, où on perçait les plus grandes fenêtres possibles.

Les constructeurs de Provence régulaient l'humidité dans les pièces principales, les protégeaient du vent, captaient la chaleur des rayons solaires d'hiver mais pas d'été, etc. Bref, ils employaient de multiples solutions qui toutes coopéraient pour rendre les logements confortables.

Les douze solutions présentées ici concernent des besoins essentiels des habitats de Provence : le chauffage, le confort thermique (tempérer le logement), l'apport de fraîcheur, la conception des parois du bâtiment, les économies d'énergie et la régulation de l'humidité dans nos intérieurs. Elles sont exposées de manière progressive puisque, à l'origine, cet ouvrage devait servir de support à un cours d'initiation destiné à de futurs jeunes architectes.

La bioclimatique réunit un ensemble de savoir-faire qui étaient mobilisés par des personnes peu cultivées, mais qui ne manquaient pas de bon sens. Il s'agissait souvent de cultivateurs un peu âgés, de personnes d'expérience, mais qui ne connaissaient rien de nos mathématiques actuelles. Ce sont des principes simples. Ils permettent, petit à petit, d'envisager et de s'approprier les fondamentaux de la thermique des bâtiments. Ils permettent surtout d'améliorer considérablement le confort d'un logement, quel qu'il soit, sous le soleil du Midi et le mistral.

L'exposé de ces douze solutions commence par des exemples tirés de l'histoire du bioclimatisme dans la construction des bâtiments, des points de vue simples, aisément compréhensibles par tout un

Copyright © 2016 Eyrolles.

chacun. Puis on abordera les angles de l'irradiation solaire, et on verra qu'ils peuvent conditionner notre utilisation des vitrages. La complexité ira croissant, petit à petit, en définissant chaque terme technique plutôt deux fois qu'une. Lorsque le lecteur, au terme des douze solutions proposées, abordera la conception des parois, il aura déjà compris les bases de la thermique des bâtiments. Il commencera à se poser des questions éclairées. Il devrait alors avoir acquis les bases propices à la prise de bonnes décisions pour son projet.

Si vous habitez le midi de la France, que vous soyez autoconstructeur, que vous rénoviez une maison ancienne (ou moderne) ou que vous ayez un projet de construction, les savoirs de nos anciens vous seront utiles. Ils ne manquaient pas de bon sens et connaissaient les contraintes des climats locaux comme personne. Ils privilégiaient certains principes, simples, particulièrement efficaces (et souvent oubliés).

La bioclimatique n'a rien de nouveau. De fait, les vieilles bâtisses qui ornent encore nos campagnes et nos villages de Provence illustrent toujours son application. Utiliser ces principes anciens et les conjuguer avec nos matériaux modernes ne constitue pas une novation, tout au plus un re-nouveau : un renouveau thermique. Il s'agit de tirer parti de la connaissance des contraintes climatiques locales et des solutions que des millénaires de construction ont mises au point ; il s'agit aussi de les mettre en œuvre avec nos matériaux contemporains dans le cadre de nos réglementations actuelles.

C'est une grande ambition que de souhaiter construire mieux pour édifier des bâtiments plus sains, plus confortables et plus économes. C'est pourtant une ambition tout à fait réaliste : pour cela, il faudrait se remémorer certains principes constructifs que des millénaires d'expérience avaient mis au point… et arrêter de prétendre concevoir un bâtiment type, à la technologie suprême, qui hypothétiquement serait en mesure de répondre à toutes les contraintes climatiques.

Nos ancêtres ont laissé des dizaines de milliers de traces de leur savoir bioclimatique : tous les vestiges, ruines ou bâtiments anciens, qui sont disséminés sur nos territoires.

Ces vestiges montrent des propriétés thermiques adaptées à leur environnement. Chaque région utilisait des principes différents, puisque l'adaptation au climat local l'imposait, et toutes les constructions d'un même bourg employaient des principes constructifs similaires. Les bâtisses d'un vallon venté étaient toutes exactement alignées. Il existait des formes de cheminées que l'on ne trouvait que dans des vallées bien précises.

C'est un savoir-faire, il est sous nos yeux, il suffit d'apprendre à le lire.

Le mot « bioclimatisme » est entré récemment dans notre langage courant, pourtant son application à la construction de logements (« la bioclimatique ») relève d'un savoir ancestral ; c'est sa redécouverte qui constitue une novation. Les logiciels de nos thermiciens montrent qu'elle était efficace et qu'elle permettait de construire des logements confortables, agréables à vivre.

Y aurait-il un risque quelconque à considérer que le bon sens de nos anciens valait le nôtre ?

Et s'il s'avérait que certains de leurs principes peuvent se conjuguer heureusement avec nos techniques actuelles ?

À quel coût ?

Copyright © 2016 Eyrolles.

Copyright © 2016 Eyrolles.

PARTIE 1

INTRODUCTION À LA BIOCLIMATIQUE

Chaque région climatique du monde a développé un type d'habitat spécifique : chaque fois la structure et les détails constructifs de ces bâtiments correspondent à une adaptation au climat local si efficace que, répétés à l'envi, ils ont défini des styles architecturaux typiques. Ainsi la forme et les proportions d'une avancée de toit, caractéristique des constructions d'une région climatique, est directement liée à la course du soleil et à la puissance des vents dominants.
Cette sélection des meilleures solutions bioclimatiques s'est faite au cours du temps, génération après génération de constructeurs. Quand on trouvait une nouvelle solution, encore mieux adaptée au climat local et aux modes constructifs en vigueur, on l'expérimentait, on la testait encore et encore... Son emploi ne se généralisait que lorsqu'on était certain de sa durabilité et de l'amélioration qu'elle apportait au confort du logement. Il en fut ainsi, par exemple, pour les génoises.

« Lorsque le passé n'éclaire plus l'avenir, le présent marche dans les ténèbres. »
Alexis de Tocqueville

Copyright © 2016 Eyrolles.

1| Histoire du bioclimatisme

L'histoire du bioclimatisme a commencé le jour où un homme s'est demandé comment construire un toit pour se protéger des éléments climatiques. Les habitats sont devenus permanents à la fin du Dryas récent, lorsqu'un réchauffement cataclysmique a contraint les humains à se fixer près des points d'eau. Jamais, dans les 400 000 ans de relevés glaciaires arctiques, on n'a noté de réchauffement aussi violent et aussi brutal : en quarante ans, vers 10 000 avant notre ère, les températures moyennes se sont élevées de 15 °C ! Pour faire face à cette situation, les humains de l'époque ont inventé, dans l'urgence, un habitat rudimentaire mais thermiquement efficace.

1. Adaptation des peuples au changement climatique

Les Natoufiens

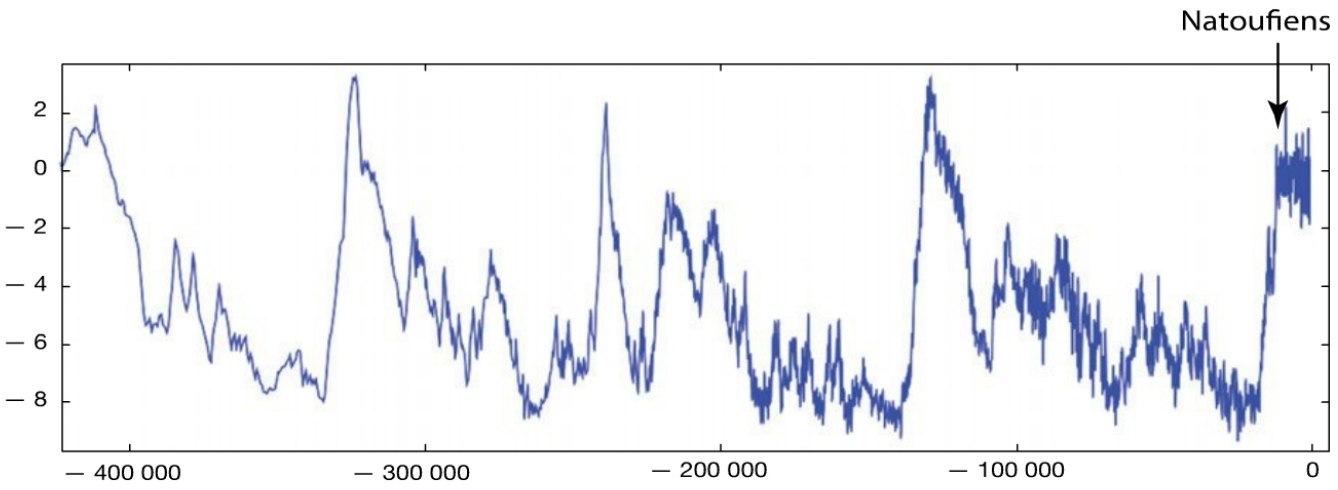
Les Natoufiens vivaient de la chasse à l'ours (au filet) dans une des forêts les plus giboyeuses du monde de l'époque, du côté du Jourdain. Un changement climatique soudain a fait monter les thermomètres de 14 °C en deux générations ! Quarante ans plus tard, au même endroit, ils se retrouvèrent à chasser la gazelle dans une savane sèche (et durent inventer l'archerie). Ils adaptèrent leurs habitats en conséquence. Ils ne connaissaient pas les isolants, ni le verre ni les joints ; aussi choisirent-ils d'enterrer leurs maisons à 1,40 m de profondeur. Autrement dit, absolument toutes leurs constructions se sont trouvées enterrées à exactement 1,40 m de profondeur, et il s'agissait bien là d'un choix. Ce choix prenait évidemment en compte la difficulté qu'il y avait à creuser aussi profondément dans une terre pierreuse quand on ne disposait que de ses mains, du feu, d'épieux et d'omoplates d'animaux en guise de pelles.

Tout le peuple natoufien adopta exactement la même solution bioclimatique. Cette technique était aboutie, puisque l'intégralité des logements, quel que fût le village, furent exactement construits à la même profondeur.

Dans chaque bourg, une « maison » plus grande que les autres (5 m de diamètre au lieu de 3) abritait un « puits ». Celui-ci n'était pas destiné à y puiser de l'eau, mais à piéger l'air froid nocturne. Il servait au stockage des aliments. Cette technologie-ci restait vraisemblablement encore perfectible, puisque la profondeur de ces « réfrigérateurs naturels » n'était pas constante.

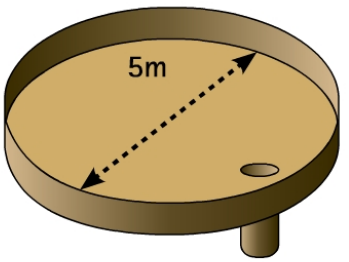
Les Natoufiens de 10 000 av. J.-C. formèrent un peuple extraordinairement inventif, au point de

Copyright © 2016 Eyrolles.

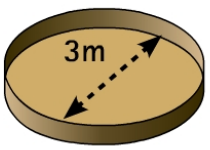


Variations des températures moyennes sur terre, d'après les carottes glaciaires du Groenland, 400 000 ans.

constituer le jalon qui marque l'entrée des humains dans le Néolithique. Implantés en villages, leurs habitats devaient apporter protection et confort. Ils n'auraient pas fait l'effort colossal d'édifier chacune de leurs maisons en creusant à 1,40 m de profondeur si cela n'avait pas présenté un intérêt majeur. Or, du point de vue énergétique, cette profondeur constitue un excellent compromis entre la masse thermique terrestre (amortissement des amplitudes) et la température constante (soit, dans cette région, 15,5 °C à 7 m sous terre). Les Natoufiens ont donc mis au point un système constructif qui conférait naturellement un climat tempéré à leurs logis. C'était la meilleure adaptation possible au changement climatique extraordinairement violent qu'ils connaissaient.



1,4 m de profondeur par 5 m de rayon.



1,4 m de profondeur par 3 m de rayon.

Le confort de l'habitat natoufien

Les sept premiers mètres du sol subissent les variations thermiques de l'air ambiant mais la grande inertie du sol les décale dans le temps : le pic de froidure en surface a lieu à la fin janvier, le long des rives du Jourdain, mais au début du mois de mars à 1,40 m de profondeur. La puissance de transmission des températures de l'air à la terre dépend de l'humidité de celle-ci. Or les Natoufiens vivaient une des pires sècheresses de l'histoire, donc les sols étaient particulièrement secs. On estime que les différences moyennes de température entre le jour et la nuit dépassaient 20 °C, alors qu'à 1,40 m de profondeur elles avoisinaient 8 °C. De même, on estime que dans cette région du monde les températures moyennes variaient de 12 °C entre l'été et l'hiver mais seulement de 4 °C à 1,40 m de profondeur. Mieux encore : lorsque le soleil réchauffe la surface du sol, l'onde de chaleur met environ 36 heures pour atteindre 1, 40 m de profondeur, aussi la température ressentie au fond des habitats natoufiens au plus froid de l'air de la nuit (4 h du matin) correspond au réchauffement dû au pic de chaleur de l'avant-veille (4 h de l'après-midi). Creuser à 1,40 m de profondeur représentait un effort important mais apportait un confort thermique remarquable pour l'époque, jour après jour : passivement.

Copyright © 2016 Eyrolles.

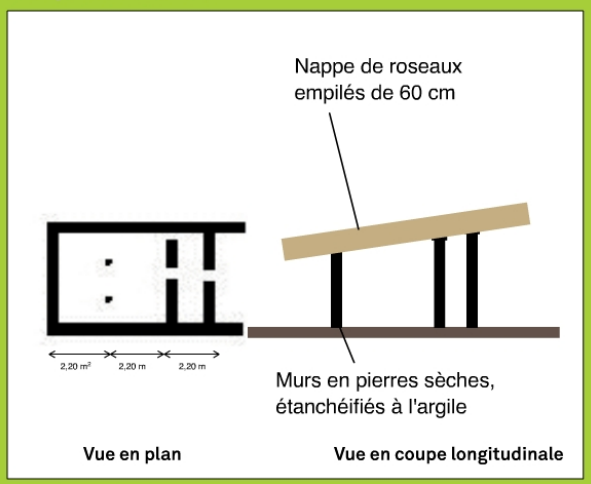
Chapelle blanche de Sesostris, Karnak, Égypte, Moyen Empire. © www.sylviebarbaroux.blogspot.com

Les Mureybétiens

En – 8500, dans la même région, les Mureybétiens appliquèrent un principe de construction bioclimatique similaire. Mais ils furent confrontés à un problème nouveau, certains de leurs villages devant être édifiés dans des oasis, sur du sable : impossible de creuser des habitats dans ce sol instable. Ils décidèrent de s'inspirer du schéma des cabanes provisoires qu'ils édifiaient lorsqu'ils poursuivaient un troupeau de gibiers durant des jours. Ils disposaient de bois et de roseaux. Ils assemblèrent donc des armatures en bois (poteau-poutre) et les recouvrirent de roseaux glanés à proximité.

Très vite, les Mureybétiens découvrirent les propriétés thermiques du roseau : c'est un excellent isolant, il régule aussi remarquablement l'humidité. Il est particulièrement efficace lorsqu'il est comprimé en nappes très denses.

Dans ces pays arides, la protection contre la pluie était accessoire, le principal problème étant la chaleur. Les Mureybétiens se mirent à couper des roseaux en quantité. Ils en amoncelèrent sur leurs toits jusqu'à atteindre des épaisseurs de 60, voire 80 cm. Ils prémunirent ainsi leurs logements des rayons solaires presque verticaux de l'été. Ils alignèrent la majorité de leurs cabanes vers le sud et en protégèrent l'entrée par un sas et une ombrière qui avançaient de 2,20 m.



L'un des modes de construction mureybétiens.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Entre 2000 et 1900 avant notre ère, la Terre connut un refroidissement conséquent qui modifia profondément le régime des pluies. Les Égyptiens, les Phéniciens et les Crétois formaient alors les trois peuples dominants de la Méditerranée.

Chacun d'eux chercha des solutions pour que ses habitats devinssent plus agréables. Du fait du refroidissement climatique, il fallut trouver un moyen pour réchauffer un peu plus l'intérieur des bâtiments. Aucune de ces civilisations n'eut recours aux cheminées.

Les Égyptiens du Moyen Empire et l'utilisation de la masse thermique

Ce furent les Égyptiens du Moyen Empire qui mirent au point la parade de la masse thermique, et ce fut par hasard.

Le changement du régime des vents avait asséché le Sahara. Les pluies s'étaient déplacées nettement au sud du tropique du Cancer, c'est-à-dire vers la zone de captage hydrographique du Nil. Le fleuve, gonflé d'eau, coula dans une terre plus désertique. Il s'ensuivit des inondations catastrophiques, des famines et la décadence de l'Égypte (Moyen Empire). Les temples étaient construits à plat sur une terre damée. Comme l'économie se trouvait au plus mal, on en construisit peu. Les temples que l'on édifia le furent sur une plate-forme de pierres destinée, en les surélevant, à les protéger des inondations. Les prêtres égyptiens constatèrent rapidement que les températures dans ces temples s'avéraient particulièrement agréables.

Les Phéniciens du Moyen Empire et le transfert d'énergie

Les Phéniciens constituaient, à la même époque, le peuple commerçant de la Méditerranée. Ils voyageaient constamment et ils remarquèrent que ces plates-formes étaient adossées à un grand escalier maçonné dirigé plein sud. Ils notèrent aussi que ces temples étaient plus chauds en hiver que les autres. Quand ils en eurent compris le mécanisme, les Phéniciens l'appliquèrent en l'améliorant. Dès cet instant, et jusqu'à la fin de la période froide, tous les temples qu'ils construiront le seront sur une haute plate-forme précédée d'un escalier raide orienté au sud. La forme et les dimensions de la rampe furent répétées à l'envi : celles-ci permettaient de transférer l'énergie dans la structure de telle manière que l'irradiation d'été sur la rampe chauffait l'intérieur du temple en hiver.

Les Crétois et l'évacuation de l'air froid

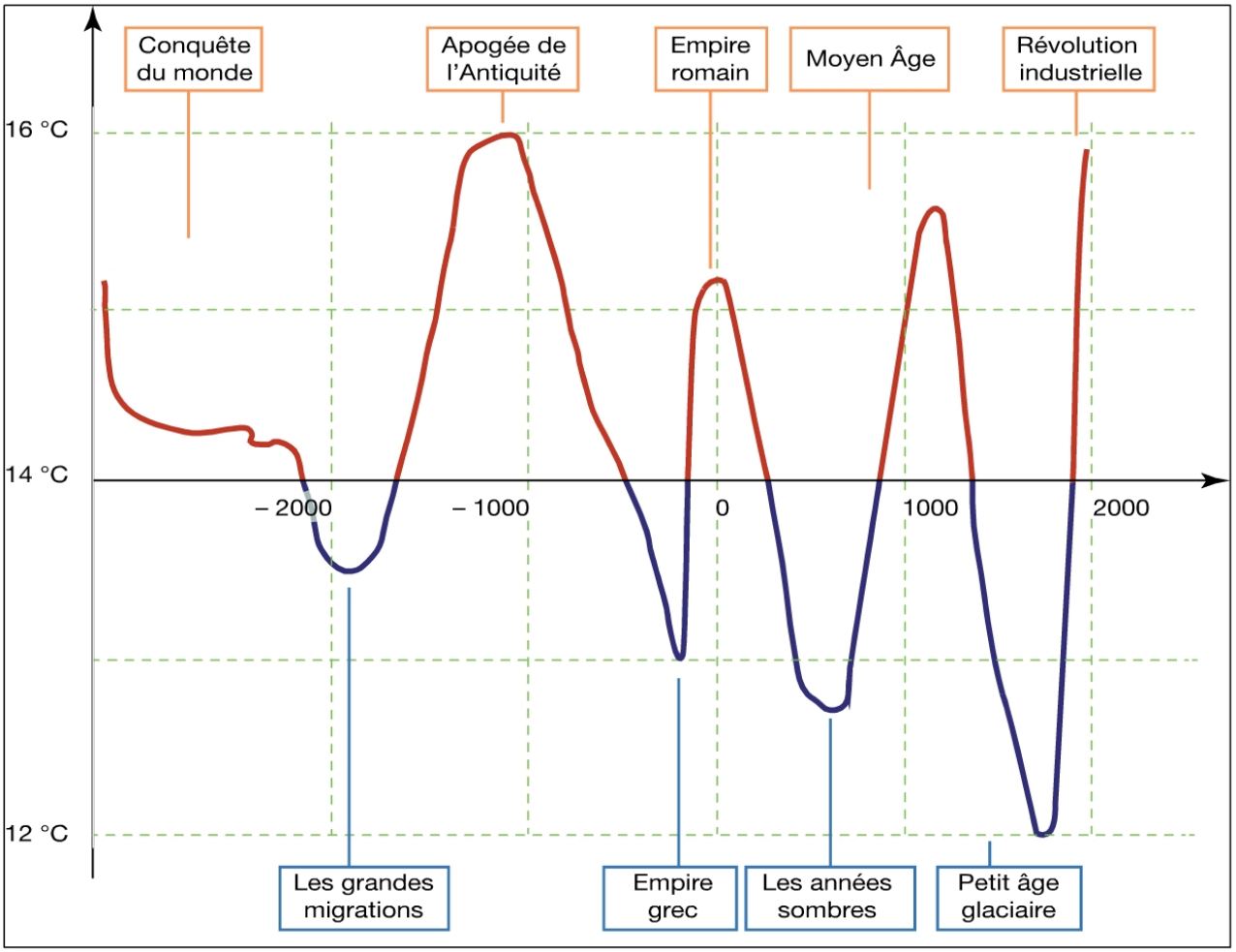
En Crète, le palais de Cnossos fut largement agrandi. On ajouta des bâtiments à côté des zones de stockage, on les ordonna autour d'une vaste cour, et surtout on y construisit un large couloir en pente, qui permettait d'en évacuer l'air froid durant les hivers.

Chacun de ces peuples avait trouvé une solution rendant la thermique de ses bâtiments si efficace qu'aucun n'eut besoin de recourir à un chauffage complémentaire au bois : ils ne construisirent pas de cheminées ! C'est la conception de leurs bâtiments qui évolua vers l'utilisation de l'énergie solaire. Cette démarche fut suffisante pour satisfaire l'essentiel du besoin en énergie supplémentaire demandée par les habitats : celui qu'imposait le changement climatique du moment.

Les Égyptiens du Nouvel Empire et le stockage de fraîcheur

Les Égyptiens du Nouvel Empire (jusqu'à – 1080) construisaient des maisons de terre battue, recouvertes de roseaux et d'un peu d'argile. Les habitats

Copyright © 2016 Eyrolles.



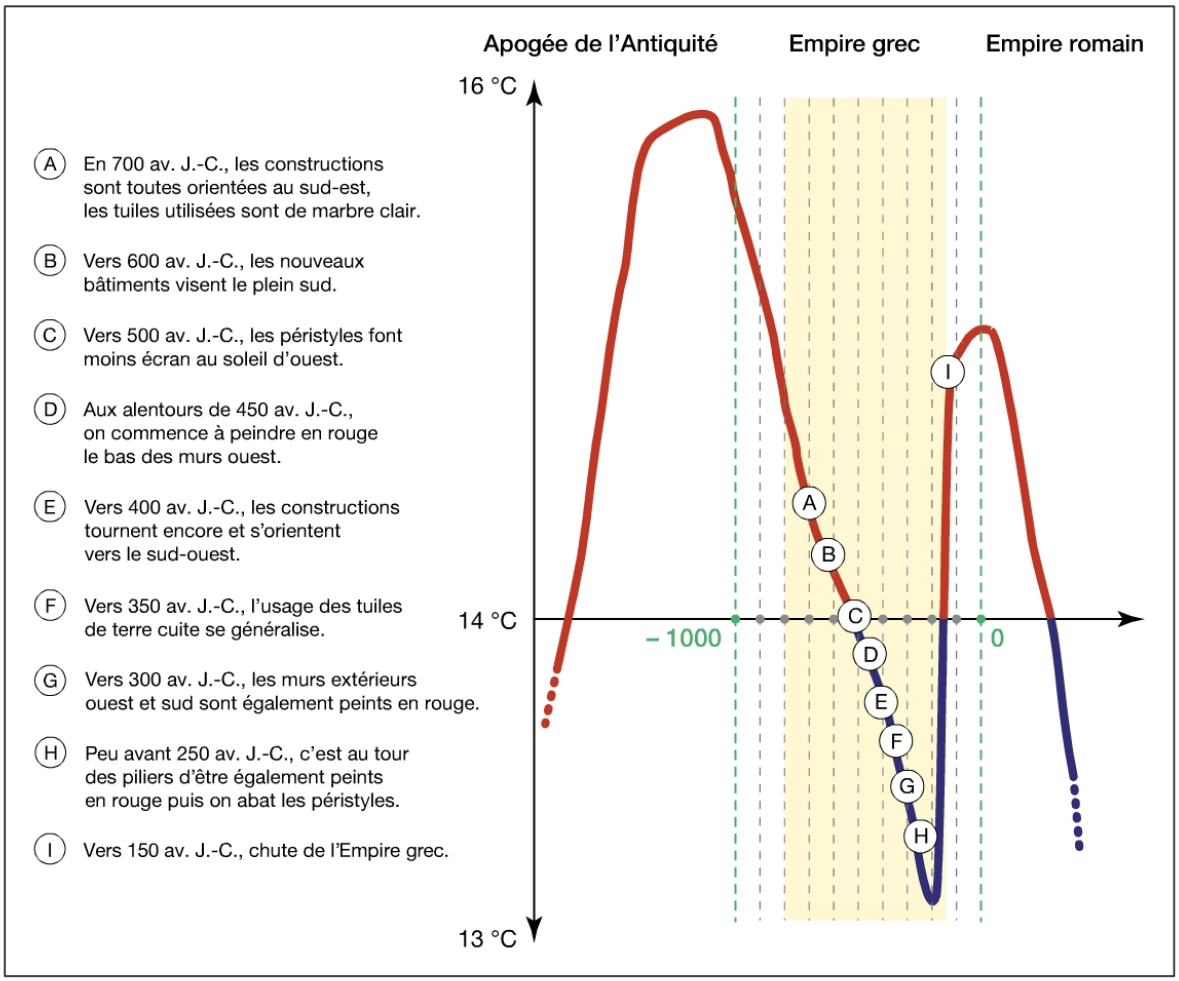
Variations des températures moyennes sur terre depuis l'Antiquité (hémisphère nord).

des ouvriers étaient plats, mais ceux des cadres comportaient tous une cave. Pourquoi préférer une cave (creusée) à une pièce supplémentaire ? L'effort eût été moindre. Or les nuits sont fraîches dans les régions désertiques, la cave offrait l'avantage de permettre de stocker cet air frais. S'il faisait trop chaud dans la maison, en début d'après-midi, il suffisait d'ouvrir la porte de la cave: l'air se déplaçait lentement du froid vers le chaud, créant un courant d'air raffraichissant à travers la pièce à vivre. Les Égyptiens fortunés pouvaient donc ainsi réguler la température de leur habitat. Ne disposant pas de machines, ils se contentèrent de créer un stockage d'air frais là où ils conservaient leurs aliments. La climatisation de leurs logements reposait sur une conception éprouvée et une porte.

Les Grecs et l'acclimatation des constructions

Les Grecs inventèrent l'architecture. Ils se servirent de l'astuce perfectionnée par les Phéniciens et apportèrent des améliorations considérables à la conception des péristyles. De – 700 à – 250, ce peuple vécut dans un climat de plus en plus froid ; cette période correspond à la « Grèce archaïque ». Puis, de – 250 à l'an 1, les températures allèrent en

Copyright © 2016 Eyrolles.



Dispositifs bioclimatiques inventés sous l'Empire grec.

se réchauffant, c'est la « Grèce hellénistique ». La conception de leurs constructions dut s'adapter à ces évolutions des températures moyennes du moment.

On pourrait dater la construction de la plupart des bâtiments grecs en se basant sur leurs caractéristiques thermiques, qui reflètent l'adaptation des architectes grecs au changement climatique qu'ils ont connu.

L'effet de cliquet de l'évolution de la bioclimatique continua à sélectionner les solutions les plus adaptées. Les Romains perfectionnèrent le système de rafraîchissement par captage d'air nocturne. Dans ces régions où le ciel est clair, les amplitudes thermiques sur 24 h dépassent régulièrement les 14 °C. La plupart des maisons romaines furent construites autour d'un atrium. Il y en eut d'autant plus que les températures moyennes du globe s'élevaient.

Ces anciens adaptaient leurs constructions au climat du moment. Ils faisaient de la bioclimatique sans le savoir. Ils cherchaient tout simplement à vivre le mieux possible.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Les Mayas et l'adaptation obligatoire au climat

Les Mayas avaient rendu obligatoire cette adaptation au climat du moment. Leurs prêtres considéraient que, le climat évoluant constamment, les maisons devaient être adaptables. Ils étudiaient particulièrement les trajets du Soleil, de la Lune et de Vénus. Ils en avaient déduit un calendrier très précis basé sur des « siècles » de 52 ans. Chaque fois qu'un cycle se terminait, toutes les constructions de l'Empire maya devaient être mises à bas. Tout ce que les hommes avaient édifié se trouvait démonté et mis au sol. La durée d'une construction était donc connue.

Lorsque tous les constituants de chaque maison avaient été alignés par terre, les prêtres annonçaient comment il fallait reconstruire. Avec les mêmes matériaux, un peu de terre et beaucoup d'efforts, toutes les familles réédifiaient leur maison. Selon les instructions des prêtres, elle pouvait être orientée légèrement différemment, elle pouvait avoir un toit un peu plus long… et se trouver mieux adaptée au climat prévu par les astronomes. Les conquistadors espagnols avaient été très frappés de constater que toutes les maisons de Tenochtitlan étaient rigoureusement parallèles et que tous leurs toits affichaient exactement la même pente.

On a oublié un grand nombre des solutions thermiques découvertes par nos anciens. Deux épidémies de peste et deux guerres mondiales ont rompu la transmission du savoir.

Le bioclimatisme a été mis en équations à la fin des années 1970. Ce furent d'abord les plus grandes universités américaines qui effectuèrent des simulations informatiques de la thermique des bâtiments. Elles modélisèrent sur leurs ordinateurs certaines réflexions remarquablement efficaces mises au point par des communautés hippies. On put mesurer combien les procédés constructifs traditionnels des Indiens d'Amérique se révélaient thermiquement performants.

Il s'ensuivit une grande créativité conceptuelle. On construisit des maisons solaires. On s'essaya à stocker la chaleur. On inventa les caméras thermiques et même le thermosiphon. On aboutit rapidement à des solutions compliquées. Ces recherches passèrent de mode jusqu'à ce que, à Darmstadt, un Allemand édifie une maison passive et agréable à vivre. Le mouvement actuel pour des bâtiments thermiquement performants s'est largement inspiré de ces travaux.

La réglementation thermique 2012 a placé la bioclimatique au premier plan. Pour la première fois en France, un permis de construire pouvait être refusé par une mairie si le bâti n'était pas assez compact, si les baies étaient orientées au nord ou des fenêtres mal conçues.

Auparavant, la bioclimatique n'avait rien de réglementaire. Ce n'était qu'un simple savoir-faire : du bon sens appliqué aux constructions. On comprend maintenant que s'en inspirer peut largement faire diminuer les besoins en énergies fossiles.

2. Qui a pratiqué le bioclimatisme ?

Puisqu'il s'agit de la relation entre le vivant (« bio ») et le climat, à peu près tous les êtres vivants ont ou ont eu une approche bioclimatique de leur logement. On connaît l'exemple des pièces tampons créées par les termites pour se protéger des intempéries. On imagine les fourmis tapissant d'isolant une paroi.

On sait bien que les nids des oiseaux sont souvent orientés en fonction du soleil. Les montagnards disent que les terriers des marmottes s'enfoncent plus profondément si l'hiver sera froid.

Les demeures anciennes d'une vallée sont construites selon les mêmes principes et s'adaptent

Copyright © 2016 Eyrolles.

au microclimat local : édifiées avant l'ère du pétrole, elles sont alignées, leurs toits ont tous la même forme, voire le même modèle de tuiles, leurs murs sont pourvus d'une épaisseur constante.

Jusqu'à la Première Guerre mondiale, les Provençaux qui se trouvaient en charge de la construction étaient généralement des hommes de la terre : les mestres. Ils savaient lire dans la topographie les zones humides ou celles qui offraient prise au vent, ne venaient jamais de très loin, savaient où dénicher des matériaux et connaissaient les particularités du microclimat local. Ils avaient peu d'éducation, mais comptaient fort bien et connaissaient une infinité de « tours de main », fruits de dizaines d'années d'expérience. Quelques grands esprits avaient étudié Vitruve et les écrits des architectes andalous : ceux-là concevaient les bâtiments des rois.

On perçoit intuitivement le bioclimatisme comme un concept éloigné de notre quotidien. C'est exactement le contraire. Nous entretenons tous une relation avec le climat, puisque nous baignons constamment dedans.

Quand il fait chaud, nous nous habillons tous avec de vêtements plus légers. Mieux : nous privilégions des fibres adaptées. Notre expérience nous a montré, par exemple, que nous transpirions plus dans des chaussettes en matière synthétique que dans celles composées à 100 % de coton.

Comparons une chaussette en synthétique et une autre en coton ayant rigoureusement le même poids, la même coupe et la même densité de tissage.

À noter

La bioclimatique n'est pas difficile, parce que ceux qui l'ont appliquée n'étaient pas des savants ; ils ne savaient pas toujours lire et écrire. Il ne s'agit pas d'une science, mais d'un savoir-faire : l'expérience cumulée de 12 000 ans de bon sens pratique. Il s'agit de principes simples.

Si un design particulièrement attrayant ou un effet de mode nous amenait à mettre, en plein été, une paire de chaussettes en synthétique, nous remarquerions en fin de journée que nous avons plus transpiré qu'à l'habitude. Nous ferions appel à notre expérience et nous en conclurions : « Évidemment, c'est parce qu'elles sont en synthétique ! » Si nous souhaitons moins transpirer, nous mettrons dorénavant exclusivement des « chaussettes en coton ». Notre bon sens est établi.

Il faudra une nouveauté technique pour nous faire changer d'avis, et ce uniquement après que nous l'aurons testée et retestée (par exemple : membranes perspirantes, microfibres). Nous agissons donc exactement comme nos ancêtres. La solution est le fruit de l'expérience.

La bioclimatique consiste à observer ce savoir-faire et à essayer de le comprendre. Les thermiciens considéreront le diamètre des fils, leur torsion, et calculeront l'émission de chaleur due au frottement des fibres entre elles. Ils pourront calculer précisément l'apport d'énergie et sa transmission à la peau du pied.

Nous utilisons des procédés bioclimatiques que nous qualifions de « simple bon sens ». En Provence, le soleil d'été tape fort. Les grandes fenêtres y sont protégées par des volets. Durant les heures chaudes, les volets sont tirés par la maîtresse de maison, mettant ainsi les baies à l'ombre. Dès la fin de l'après-midi, on les ouvre « pour laisser entrer la fraîcheur ».

Lorsqu'une fenêtre est perçue comme froide, la nuit, nous tirons un rideau devant elle. Si nous restons assis devant cette fenêtre et que nous sentons un filet d'air froid, nous poussons le bas du rideau contre le bas de la fenêtre, machinalement. Pourquoi ? Parce que l'air froid s'écoule par le bas.

Après guerre, nous avons eu le choix entre les matières synthétiques et les matières

Copyright © 2016 Eyrolles.

traditionnelles. Nous savions que la laine isolait plus du froid que le coton, même si nous ignorions que c'était parce que les fibres animales (laine, soie) piègent plus d'air immobile que les fibres végétales (lin, coton...). Notre expérience nous a vite révélé que les toiles synthétiques protégeaient moins bien du froid. Quant aux fibres traditionnelles, nous n'ignorons pas que plus le tissu est épais, plus il protège des variations de température, l'effet isolant du tissu étant dû à l'air immobile (le meilleur des isolants thermiques).

3. Aujourd'hui se présentent de nouvelles options

Par exemple : qu'est-ce qui est thermiquement le plus efficace ? Une fenêtre simple vitrage munie d'un rideau ou bien une fenêtre double vitrage ? La qualité des joints utilisés dans la fabrication des fenêtres à double vitrage leur confère une telle efficacité thermique qu'il faudrait un rideau de 50 cm d'épaisseur pour obtenir le même effet. Intuitivement, nous savons déjà arbitrer : une fenêtre à double vitrage est plus efficace qu'un double rideau, plus encore qu'un rideau simple. Pourquoi ? Parce que nombre d'expériences, autour de nous, nous ont permis d'établir notre opinion sur le sujet. Il ne s'agit plus là d'un savoir ancestral, mais d'une multitude de savoirs accumulés. Ces expériences forment un savoir collectif récent. Nous n'avons pas besoin de formules mathématiques compliquées pour arbitrer entre deux messages commerciaux antagonistes.

Ce qui dessine une limite : quand les « solutions » proposées sont trop récentes ou trop peu diffusées pour avoir pu permettre à notre bon sens de se construire, nous sommes incapables de nous faire une opinion.

Les publicités atteignent très adroitement notre cerveau. Comment faire un choix éclairé entre leurs promesses contradictoires ? La diffusion à grande échelle de leurs messages tend à nous confondre.

Par exemple : quelle expérience avons-nous des vitrages à couches de contrôle solaire ? Quel savoir collectif nous permet de comparer les avantages des dépôts métalliques par pyrolyse à ceux qui utilisent des pulvérisations cathodiques sous vide ? Nous identifions la marque, nous entendons le message publicitaire (« la promesse »), mais nous

Les mestres

Un Provençal, mestre Robert, a défini ce qu'il appelait « les trois principes essentiels ». Il prétendait que toute la conception des bâtiments découlait de ces trois états de la matière.

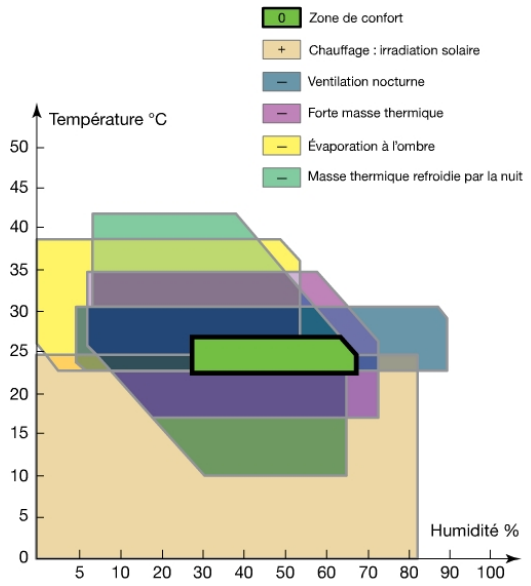
Premier principe
L'air se déplace du froid vers le chaud. Il augmente de volume en se réchauffant. L'air chaud monte. À l'extrême, on considère que l'air le plus chaud se rapproche des propriétés d'un éther. L'air le plus froid se comporte pratiquement comme de l'eau : il coule. À température constante, les gaz se déplacent vers la zone de moindre pression.

Deuxième principe
Dans un solide, la chaleur se propage du point chaud vers le point froid. Les solides sont physiquement stables.
Lorsqu'on met un fer au feu, ce n'est pas le feu qui s'éteint, mais la main qui brûle. L'énergie se déplace par conduction le long du métal.

Troisième principe
Dans un liquide, les températures s'homogénéisent (du chaud vers le froid). Les liquides se déplacent selon la loi de la gravité.

Les mestres n'étaient pas des savants, mais des « sachants » ; ils ne connaissaient pas les fondamentaux scientifiques, mais possédaient des savoir-faire.

Copyright © 2016 Eyrolles.



Plages d'efficacité de cinq principes bioclimatiques.

ne pourrons pas nous appuyer sur notre bon sens pour départager les produits. Nous ne disposons pas d'assez d'expérience pour cela.

Si nos connaissances scientifiques sont insuffisantes, nous sommes à la merci du discours commercial le plus séduisant.

4. Échanges de chaleur

Entre deux corps dont la température est différente, il se produit inévitablement un échange de chaleur. Aucun moyen ne permet d'empêcher l'échange de chaleur. On peut néanmoins freiner cet échange de calories (ou de thermies) et en atténuer les excès (amortissement des températures).

Si on laisse une casserole d'eau chaude dans sa cuisine, l'échange de chaleur va perdurer jusqu'à ce que l'air ambiant, la casserole et l'eau se trouvent à la même température.

Pour les corps solides, le principe de base est que la chaleur se dissipe du chaud vers le froid (*« Mets fer au feu, ta main protège »*). Si on tient l'extrémité d'une barre de métal dans sa main et que l'on en place l'autre extrémité sur une flamme, l'agitation des atomes va se propager tout au long de la barre de métal, jusqu'à ce que cette chaleur se transmette à la main. C'est un échange de chaleur par conduction. C'est ce que l'on éprouve lorsqu'on marche pieds nus sur un sol frais ou que l'on se lave les mains à l'eau chaude. Si de l'air passe le long d'une source chaude, il va (par simple échange thermique) capter des calories et donc se réchauffer. C'est un échange de chaleur par convection. Ce type d'échanges est accentué par la vitesse de l'air. Si le sol est très froid et que le vent passe sur ce sol, l'air va se refroidir et on le ressentira sur la peau. Si le vent est fort, l'impression du froid ressenti sera encore plus puissante.

Un chauffage d'appoint au gaz, une masse thermique ou bien les rayons solaires vont transmettre la chaleur par la diffusion de rayonnements infrarouges. On l'appelle échange de chaleur par rayonnement (ou radiation). L'importance du rayonnement se matérialise lorsque nous comparons la chaleur ressentie en entrant dans une voiture garée à l'ombre à celle d'une voiture garée au soleil.

Supposons que, dans un logement, se trouve un escalier en béton solidaire d'un mur extérieur et que ce mur ait été chauffé par le soleil (par rayonnement). Chacune des marches de l'escalier se verra transmettre (par conduction) une bonne part de la chaleur du mur extérieur. L'air froid qui était sous l'escalier va aussi se réchauffer, se dilater, monter, lécher les marches de l'escalier et chauffer l'air ambiant (par convection). Il fera plus chaud près de l'escalier. À ce moment-là, celui-ci se comporte comme un immense radiateur : il diffuse puissamment une chaleur douce. Cette énergie provient du soleil. Elle est gratuite et particulièrement bienvenue en hiver.

Troisième principe : Dans un liquide, les températures s'homogénéisent (du chaud vers le froid). Les liquides se déplacent selon la loi de la gravité.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Conclusion

Lorsque notre bon sens est établi, nous pouvons compter sur lui. Lorsque ce n'est pas le cas, seule l'approche la plus rigoureuse (scientifique) peut nous éclairer valablement.

La bioclimatique est un savoir trop simple pour nous permettre de comparer des produits ou des procédés industriels innovants. Elle s'appuie sur un savoir local, une somme d'expériences souvent ancestrales. Les savoir-faire bioclimatiques ont été confirmés par les scientifiques, mais les procédés employés se basent surtout sur le bon sens. Elle ne refuse pas les matériaux modernes. Elle les emploie selon des principes connus basés sur la somme des expériences de nos prédécesseurs. Ce n'est pas une science, mais un savoir-faire.

À noter

La bioclimatique consiste à se servir des phénomènes thermiques ou hygrométriques naturels, et souvent perpétuels, pour s'assurer un meilleur confort de vie.

Ce savoir-faire bioclimatique se matérialise surtout dans la conception des bâtiments. Par essence, il consiste à dessiner des maisons structurellement peu énergivores. Il prend en compte toutes les énergies fournies par le climat local et tente de les utiliser au mieux, pour le bien-être des habitants du logement. Il complexifie le travail des architectes parce qu'il s'attache au moindre détail.

Chaussettes en coton ou en Nylon ?

Les fibres de coton ont une composition chimique très proche de celles du bois. Lorsqu'elles sont en vie, elles pompent de l'eau au travers de minuscules canaux. Observées avec un microscope électronique, on constate qu'après avoir été séchées, leurs canaux ne contiennent plus de l'eau mais de l'air. Si on utilise un microscope optique, on verra que ces fibres de bois ont l'apparence d'un agglutinement d'espèces de ressorts distendus. Les espaces entre ces « ressorts » sont emplis d'air. Si le fil a été confectionné très serré, les « ressorts » sont comprimés les uns contre les autres et ils emprisonnent cet air. Si deux fils ont été enroulés l'un contre l'autre afin de constituer un fil plus résistant (« fil retors »), on constatera que les « ressorts » de l'un et de l'autre finissent par créer des liaisons entre eux. Une goutte d'eau posée sur la fibre se fractionne, s'étend et se répartit entre les « ressorts ». Lorsque nous marchons, nos chaussettes subissent des efforts mécaniques. Tous les « ressorts » sollicités se distendent et se retendent, accompagnant les mouvements de nos pieds.

Les fibres synthétiques sont lisses, raides. Elles sont produites en étirant une goutte de matière. Il s'agit donc de tubes pleins. Prenons pour exemple un Nylon. Au microscope électronique, on voit des fils d'un diamètre à peu près constant, constitués de longues chaînes carbonées (les monomères), parallèles, unies entre elles par de solides liaisons amides (carboxyle-azote). Au microscope optique, on constate que ces fibrilles sont tissées entre elles, mais qu'elles n'ont pas (à de rares exceptions près) de liaisons chimiques ni physiques. Elles frottent les unes sur les autres au moindre mouvement. Ces frottements génèrent de la chaleur. Si l'on pose une goutte d'eau sur le tissu synthétique (et si celui-ci n'a pas été recouvert d'un « apprêt » chimique), la goutte est fractionnée par les fibres et se reforme de l'autre côté : l'eau le traverse. La sueur émise par la peau du pied devait le rafraîchir, or une bonne part va surtout mouiller la chaussure. Ce qui explique que l'on transpire moins dans une chaussette en coton que dans une chaussette en Nylon, surtout en été.

Copyright © 2016 Eyrolles.

2| La bioclimatique et les bâtiments passifs

Selon le dictionnaire, un bâtiment passif est une construction conçue de manière à produire autant d'énergie qu'elle en consomme. Une approche bioclimatique proposerait une autre définition : « un bâtiment passif est une construction qui consomme si peu d'énergies fossiles qu'un faible apport d'énergies durables suffit à ce qu'elle consomme moins qu'elle ne produit. »

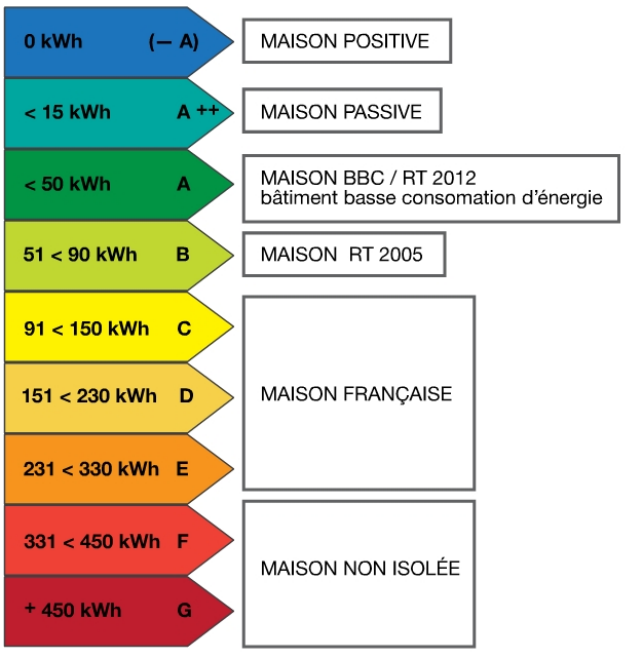
Étant donné qu'à nos latitudes, les températures auxquelles nous souhaitons vivre (de l'ordre de 20 °C) sont nettement supérieures à celles que connaissent nos hivers, on comprend vite que les maisons individuelles et les appartements n'arriveront à produire assez d'apports internes pour parvenir à un bilan énergétique nul qu'en recourant à des subterfuges extravagants : laisser couler de l'eau chaude en quantité, utiliser les pertes énergétiques des ampoules (en éclairant beaucoup) ou entasser une grande quantité de personnes dans un tout petit espace. Aussi la norme passive a-t-elle précisé sa conception :

- La consommation totale des cinq principaux besoins en énergie (chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire, éclairage et ventilation) ne doit pas dépasser 15 kWh par m^2 de surface habitable et par an.
- Les énergies renouvelables qui peuvent être produites à proximité immédiate du bâtiment s'ajoutent aux apports internes dus à l'utilisation du logement (photovoltaïque, éolien).
- Pour éviter que des maisons mal conçues se couvrent de panneaux solaires, la norme ajoute que les besoins en chauffage ne doivent pas dépasser 15 kWh/m^2/an.

L'approche bioclimatique consiste à étudier d'abord le climat local afin d'en identifier les apports thermiques (positifs ou négatifs). Chaque bâtiment étant disposé dans un microclimat particulier, il est difficile de généraliser les apports énergétiques dont tous les bâtiments pourraient bénéficier. Aussi, si l'on doit raisonner sur une solution globale et universelle de bâtiment passif, l'approche bioclimatique se focalisera sur la diminution du niveau des déperditions.

Selon une définition plus récente, un bâtiment passif serait une construction dont les déperditions seraient minimales et qui utiliserait des énergies renouvelables pour produire autant d'énergie qu'elle en consommerait. Cette définition-ci a le défaut d'autoriser à construire n'importe comment et à compenser cette incurie en recourant à de coûteuses technologies modernes. Il y a ces poutres d'acier jaillissant des façades et portant des résilles métalliques du plus bel effet esthétique qui habillent des immeubles d'autant plus modernes qu'ils sont nécessairement couverts de panneaux photovoltaïques. Ces concepts architecturaux modernistes sont souvent choisis

Copyright © 2016 Eyrolles.



Échelle de consomation des logements.

par des décideurs qui se préoccupent plus d'impressionner le chaland (l'électeur ou le touriste) que du coût d'exploitation.
En temps de crise, le coût des énergies (renouvelables ou non) contraint les architectes à faire preuve d'une grande créativité, qui n'est plus dirigée vers la seule esthétique moderniste. Nous proposons une autre définition : un bâtiment passif est une construction dont les déperditions thermiques sont pratiquement nulles.

Dans l'équation $D = U \times S \times \Delta T$, il faut que chacun des termes soit optimisé dès la conception pour qu'on puisse envisager de construire un bâtiment qui soit à énergie passive au moindre coût. Auquel cas on ne ferait appel à des générateurs d'énergie individuels (photovoltaïque, éolien, etc.) que pour compenser les pires excès du climat. Entre ces pics climatiques extrêmes, le bâtiment produirait donc plus d'énergie qu'il n'en consommerait. C'est l'objectif que vise l'Europe à l'horizon de 2020 : ne plus construire que des Bâtiments à énergie positive (BEPos). Dans son glossaire, l'Ademe les définit ainsi : « Un BEPos est un bâtiment dont la conception est telle qu'il produit plus d'énergie qu'il n'en consomme. Ces bâtiments, très isolés thermiquement et pourvus des équipements les plus économes, fonctionnent sans système de chauffage ou sans système de chauffage utilisant des combustibles fossiles. Ils produisent de l'énergie généralement au moyen d'équipements photovoltaïques raccordés au réseau électrique en quantité supérieure à leurs besoins. »

« Très isolé thermiquement » n'est pas exactement synonyme de « ayant très peu de déperditions thermiques. » La nuance est de taille. À ne se préoccuper que de l'isolation, du « U », on autorise toutes les déperditions générées par les surfaces de déperdition et la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur d'une paroi (S et ΔT). L'architecte qui dessine un volume de pièces à vivre tourmenté définit une grande surface de parois pour une petite surface habitable ; il est alors contraint de compenser son erreur bioclimatique par une plus grande isolation des parois. On comprend la nécessité de pourvoir ces bâtiments d'équipements photovoltaïques ! Le solde énergétique (déperditions – apports) peut être positif mais pas à moindre coût.

Il serait évidemment plus efficace d'optimiser l'isolation thermique des parois (« U ») ET de concevoir une surface de déperdition sur les parois la plus petite possible (« S ») ET d'entourer le bâtiment d'une atmosphère artificiellement tiédie (« ΔT ») car, dans ce cas, on aurait très peu de déperditions. Si on perd peu d'énergie de par la structure du bâtiment, on aura alors moins besoin d'apports d'énergie renouvelable (moins de surface de panneaux photovoltaïques à installer, par exemple) pour que le bâtiment devienne à énergie positive.

Le climat qui baigne une construction est animé par des énergies puissantes et répétitives. Les normes nous incitent à nous en prémunir, mais on

Copyright © 2016 Eyrolles.

Historique de la formule D = U × S × T

La formule de calcul des déperditions définit l'essentiel de la démarche : $D = U \times S \times \Delta T$
où D = déperditions (total des pertes thermiques à travers les parois)
U = coefficient de déperdition surfacique (pertes par mètre carré de paroi, dépend des isolants)
S = surface de déperdition (somme des surfaces des parois)
ΔT = différence de température entre l'intérieur et l'extérieur d'une paroi

Depuis la Seconde Guerre mondiale, nous nous sommes assez peu préoccupés des déperditions (« D »). Les architectes savaient pouvoir compenser n'importe quelle fuite thermique d'un bâtiment grâce à des émetteurs de chauffage surpuissants et surconsommateurs d'énergies fossiles. À partir du moment où le pétrole est devenu une denrée coûteuse, certains habitants de pays à hivers froids ont compris que les bâtiments d'après-guerre consommaient trop d'énergie. Des réglementations thermiques, des fournisseurs d'isolants, beaucoup d'ingénierie et la vision de quelques constructeurs ont apporté de grandes améliorations au coefficient de déperdition surfacique « U » : on a mis au point des isolations efficaces. Les bâtiments ont donc commencé à perdre moins d'énergie à travers leurs enveloppes.

À quelques précurseurs près, peu d'architectes français se préoccupaient de la surface de déperdition (« S ») il y a encore quelques années. La plupart avaient été formés à se servir de décrochés, rentrants et autres volumes en rupture pour donner du « rythme » aux façades qu'ils dessinaient. Ils multipliaient ainsi les ponts thermiques et augmentaient la surface d'échange thermique des parois sans en avoir conscience. Ils conçurent des bâtiments très modernes dont les planchers s'élançaient dans l'espace, taquinant les limites de l'équilibre, et compensèrent leurs besoins énergétiques en utilisant les chaudières les plus performantes du moment. Quant au domaine du différentiel intérieur-extérieur (« ΔT »), il est balbutiant. Les calculs des thermiciens remettent au goût du jour des concepts issus du passé (serres, patios, pièces tampons).

Les mestres du Moyen Âge n'avaient pas la chance de disposer de doubles vitrages ou de joints performants. Les ouvrants de leurs maisons laissaient donc s'échapper de l'air à l'extérieur par de multiples « fuites ». Les micropassages d'air à travers les parois ou autour des ouvrants préchauffaient des volumes autour des pièces à vivre : les pièces tampons. Dans ces volumes régnait un air à la température plus douce qu'à l'extérieur. Ils utilisaient aussi des pièces tampons ouvertes vers le ciel, dont la conception garantissait un air tempéré (atrium ou patio). Nos anciens trouvèrent des solutions passives pour que le système rafraîchissant en été ne refroidisse pas en hiver (trappes étanches, portes, marches) : la plupart de ces solutions exploitaient les excès du climat local tout en s'en protégeant.

L'invention à Saint-Gobain du verre laminé, au XVII^e siècle, permit de construire des systèmes de chauffage en hiver, comme les serres, les murs capteurs, le déphasage de six mois. Nos prédécesseurs d'avant-guerre, ne disposant pas de chauffages performants, ils ne pouvaient se permettre de négliger le « D » de « déperditions ». Leur niveau technologique leur interdisait de s'occuper du « U » (caractère isolant des parois), à quelques expédients près (roseau, terre, bois, paille). Ils utilisaient aussi le « S » (surface de déperdition du bâtiment) en construisant des centres de vie compacts. Leur génie a surtout brillé dans leur maîtrise du « ΔT » (différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur), grâce à l'orientation de la pierre au soleil, à l'esquive des vents dominants, à l'ombrage, à l'évaporation et à l'albédo, qui ont été utilisés pendant des millénaires.

Ils maîtrisaient la différence de température entre l'air intérieur et l'air extérieur par l'utilisation de la migration de l'humidité au sein des parois, du transfert thermique par conduction et des courants d'air, ce qui se matérialisait au stade de la conception des bâtiments. L'atmosphère dans les logements devait être la plus douce possible, tout au long de l'année. Ces mestres, souvent paysans, étaient choisis pour cela : on préférait ceux qui savaient bâtir des habitats plus agréables à vivre.

Copyright © 2016 Eyrolles.

pourrait aussi en profiter (par exemple, se prémunir de la fraîcheur nocturne en hiver mais aussi s'en servir pour rafraîchir le bâtiment en été).

Un bâtiment bien conçu, du point de vue bioclimatique, utilise les énergies du climat autant qu'il le peut (et évite celles qui sont excessives) afin que les consommations d'énergies fossiles restent structurellement faibles.

Les déperditions d'un tel bâtiment étant ténues et les apports énergétiques dus au climat local optimisés, pour que ce bâtiment devienne BEPos il suffira de peu d'installations captant des énergies renouvelables.

La conception bioclimatique utilise des principes constructifs traditionnels qui tirent parti des caractéristiques énergétiques du climat local pour augmenter les apports naturels au bâtiment ou pour en diminuer les déperditions thermiques. Elle crée des logements agréables à vivre qui sont aussi caractérisés par la frugalité de leurs consommations.

Les calculs nous ont montré que la bioclimatique permet de concevoir des bâtiments passifs. Néanmoins, au-delà de l'efficacité thermique, l'approche bioclimatique vise essentiellement à concevoir des logements agréables à vivre.

Changement de paradigme

Les architectes en exercice ont été formés après guerre, dans une période où le pragmatisme consistait à produire le plus de bâtiments possible au plus vite. Gouvernement et particuliers leur imposent maintenant une nouvelle règle, celle de l'économie des consommations d'énergie.

Les nouvelles normes de conception des bâtiments sont essentiellement axées sur l'isolation des parois et l'efficacité des systèmes de chauffage. Elles se veulent universelles et négligent les particularités des climats locaux. Elles contraignent l'architecture dans un carcan administratif, mais elles oublient qu'il fait toujours plus chaud les jours d'été que les nuits d'hiver.

La bioclimatique utilise les énergies apportées par le climat. Elle a le défaut de demander un effort de conception très important, mais a fait la preuve de son efficacité, tant en termes de frugalité énergétique qu'en termes de confort.

Copyright © 2016 Eyrolles.

3| Adaptation du bâti au climat provençal

Eugène Viollet-le-Duc, l'un des plus grands architectes du XIXe siècle, était occupé à restaurer les remparts d'Avignon. Il n'avait pas encore sa statue, à Paris, parmi les saints de Notre-Dame. En visitant la région autour du mont Ventoux, il s'étonna : « Il y a là des maisons hautes et étroites, les toits soulignés de génoises (comme à Entrevaux) et le tour de tous les ouvrants y est souligné de blanc de chaux. Nulle part ailleurs en France il n'y en a de semblables. » En quelques mots, le célèbre architecte avait décrit l'adaptation des maisons provençales à leur climat.

1. Le climat

Les abords du mont Ventoux forment une région caractérisée par des ciels clairs. Le mistral y pourvoit : son souffle puissant chasse les nuages. Les nuits sont beaucoup plus fraîches que les jours : les amplitudes thermiques quotidiennes atteignent 14 °C en hiver et 16 °C en été (en moyenne). Les précipitations y sont concentrées à la fin de ces deux saisons. Elles se caractérisent par des orages violents. Il y pleut plus qu'en Normandie, mais ces pluies sont, pour l'essentiel, concentrées sur quarante-cinq épisodes orageux par an. L'humidité ambiante y est forte (70 % en moyenne). Du fait de la forte amplitude thermique, la rosée est particulièrement abondante. Elle l'est au point que les anciens disaient que « la rosée arrose et les

Station météo	Altitude	Température été mini-maxi	Température moyenne	Amplitude moyenne	Commentaires
Carpentras	99 m		22,7 °C	14,5 °C	Zone intérieure : forte amplitude de température jour-nuit
Nice	5 m	12 °C 20 °C 27 °C	22,6 °C	7,6 °C	Zone maritime : faible amplitude de température jour-nuit

Tableau de comparaison des climats de Carpentras et Nice. Les températures diurnes d'été sont semblables entre la côte et l'intérieur des terres. Ce sont surtout les températures nocturnes qui diffèrent : 12 °C à Carpentras pour 20 °C à Nice. Les amplitudes thermiques sont donc inférieures sur la côte d'Azur de 7 °C.

Copyright © 2016 Eyrolles.

pluies lavent ». Les cieux clairs permettent une irradiation solaire particulièrement forte, équivalente à celle que connaissent Nice ou l'est de la Corse (4,8 kWh/m^2). Le froid de l'hiver y descend des pentes du Ventoux (1 912 m d'altitude). Le mistral souffle un air sec et rafraîchissant sur la région, 120 jours par an…

Hautes et étroites

Les clients des mestres souhaitaient, tout autant que nous, vivre le mieux possible. Ils ne disposaient pas de caléfactions puissantes, performantes, automatiques, voire informatisées. Le bois de chauffage coûtait cher : au Moyen Âge, les nobles n'autorisaient que le ramassage des bois à terre et frappaient de taxes sa vente dans les foires. Les Provençaux résolurent d'utiliser d'abord la chaleur du soleil. Leurs habitats devaient consommer le moins possible de combustible. Le problème n'était pas aussi simple, puisque, les étés étant torrides, il s'agissait de chauffer le plus possible en hiver mais le moins possible durant les mois chauds. Dans cette région, le soleil culmine à 72° au solstice d'été mais à 25° à celui d'hiver. Il fallait donc construire de manière à ce que le toit reçoive un minimum de calories en juillet-août et que les murs absorbent un maximum d'énergie en hiver. Cette équation n'avait qu'une solution : le toit le plus petit et la plus grande surface de façades possible. C'est bien ce que décrivit Viollet-le-Duc. Les campagnes étaient donc parsemées d'habitats sommaires de deux ou trois niveaux, la plupart mesuraient 4,40 m de large.

Maison haute provençale

Les habitants acceptaient que, dans cet espace minuscule, soit inséré un escalier raide et très étroit, le confort climatique de leur logement passait par cette contrainte. Ils auraient, bien entendu, préféré une maison de plain-pied plutôt que se contraindre, plusieurs fois par jour, à emprunter cet escalier malcommode qui empiétait sur leur maigre surface habitable.

Il suffisait de quelques bonnes récoltes pour que les Provençaux agrandissent leur logement. Les fermes partaient de ces minuscules espaces de vie. Les Provençaux ajoutaient d'abord une protection contre le mistral d'hiver en construisant un cellier au nord. Cette pièce se satisfaisait d'une ambiance plus fraîche, puisqu'on ne s'y prélassait pas : on y était toujours en mouvement. Ensuite venait la grange, invariablement construite à l'ouest ; elle protégeait du soleil torride des longs après-midi d'été. Enfin, l'étable était construite à l'est. Les fenêtres de l'habitation donnaient au sud, ses autres faces avaient été protégées au fil des années par d'autres volumes bâtis.

Copyright © 2016 Eyrolles.

2. Génoises

Les maîtres de la résurgence de Fontaine-de-Vaucluse y construisirent un château fort. C'était leur richesse. À cet endroit, une rivière qui draine le plateau d'Albion surgit après être passée sous le Ventoux. Il s'agit de la plus puissante résurgence de France. Après être « sorties de la montagne », les eaux forment une nouvelle rivière : la Sorgue. L'ancien lit de cette rivière était encore clairement marqué au Moyen Âge.

À l'époque de l'Optimum climatique, l'abondance des récoltes rendit la population prospère. Les nobles firent travailler leurs inféodés deux lunes par an. Ils les obligèrent à casser la pierre à la masse et au feu jusqu'à ce que le débord des eaux de la résurgence arrive à alimenter l'ancien lit. Alors, la Sorgue connut un débit constant, tout le surplus partant dans une nouvelle rivière : l'ancienne Sorgue. Ce fut déterminant. Tout le long de la Sorgue s'implantèrent des centaines de moulins à eau. Les pales battaient régulièrement, puisque le débit restait constant automne comme printemps. En aval, on construisit un village sur un îlot au milieu des marais : L'Isle-sur-la-Sorgue. Ses habitants firent fortune à mesure que tous les blés alentour venaient se faire moudre dans leurs moulins. Le sol des maisons était particulièrement humide, mais la région subissait un vent sec : le mistral. Le climat était très similaire à celui que connaissaient certains villages italiens proches de Gênes. Là-bas, des maçons avaient trouvé une solution constructive très performante. Les riches bourgeois de L'Isle-sur-la-Sorgue firent venir quelques artisans.

Au lieu d'appuyer l'avancée des toits sur des structures en bois, ces maçons utilisaient de très longues (et très coûteuses) tuiles. Ils plantaient la première dans les murs des maisons sur trente centimètres de profondeur. La seconde rangée venait en appui et ne pénétrait plus que de quinze centimètres dans la paroi. Quant à la troisième rangée, elle était à peine coincée entre les pierres de parement. C'est cet empilement de tuiles en haut du mur que l'on appelle « génoise ». À chaque souffle du mistral, le vent en asséchait la terre cuite. La chaux des murs transmettant l'humidité, elle assurait une concentration constante de vapeur d'eau dans toute la paroi. Puisque, via les tuiles plantées en son sein, le haut des murs avait été déshydraté par le vent, la chaux rééquilibrait la teneur en humidité de l'ensemble de la paroi en y apportant de nouvelles molécules d'eau, et ce indéfiniment jusqu'à ce que le mistral cesse.

La matière poreuse des tuiles de la génoise stockait de l'humidité jusqu'à ce que le prochain souffle de vent lèche la génoise et en fasse s'évaporer la vapeur d'eau. Or « le Magistral » souffle en moyenne un jour sur trois dans cette région. Les bâtisses de L'Isle-sur-la-Sorgue devenaient chaque fois un peu plus sèches et agréables à vivre. La succion de la vapeur d'eau contenue dans les parois avait un autre intérêt : il s'avère que la résistivité thermique augmente considérablement lorsque l'humidité diminue (R = épaisseur / λ et, puisque $\lambda = \lambda_0{}^{\Delta H}$, on obtient $U = \lambda_0{}^{\Delta H}/e$ de la paroi).

Au fur et à mesure, chaque fois que le vent soufflait sur les génoises, le mur devenait exponentiellement plus isolant.

Exactement comme vers Gênes, où le vent sec des Alpes balayait les tuiles saillant des murs des bâtiments isolés, rendant ceux-ci plus confortables. À L'Isle-sur-la-Sorgue, là où les fondations s'appuyaient sur un terrain marécageux, il fallait bien trois rangées de génoises et que l'on laissait creuses. Lorsque les bâtiments étaient plus au sec, on comblait au mortier l'intervalle entre les tuiles des génoises. Plus au nord, à l'autre bout du mont Ventoux, se dressait une autre bourgade particulièrement riche : Vaison-la-Romaine. L'eau des

Copyright © 2016 Eyrolles.

Maison des champs restaurée : haute et étroite (région de Orange).

Maisons provençales

Monter l'escalier, le descendre et recommencer... Les maisons sur trois niveaux sont moins faciles à vivre que celles de plain-pied. Pourtant, sur les montagnes qui se trouvent à proximité (mais pas au bord) de la Méditerranée, les maisons traditionnelles ont été construites en hauteur. De la Grèce au Maroc, de l'Alpujarra à l'arrière-pays provençal, l'équation « fortes chaleurs d'été et hivers brefs mais rigoureux » semble n'avoir connu qu'une solution : des « toits étroits et murs hauts ».

Avant que l'homme n'apprenne à exploiter les énergies fossiles, il ne disposait que de deux sources de chaleur pour se réchauffer : le soleil et le feu. Il utilisait les deux : les flammes qui permettaient la cuisine servaient aussi à réchauffer son foyer, mais surtout les rayons qui frappaient les murs exposés au sud réchauffaient la pierre.

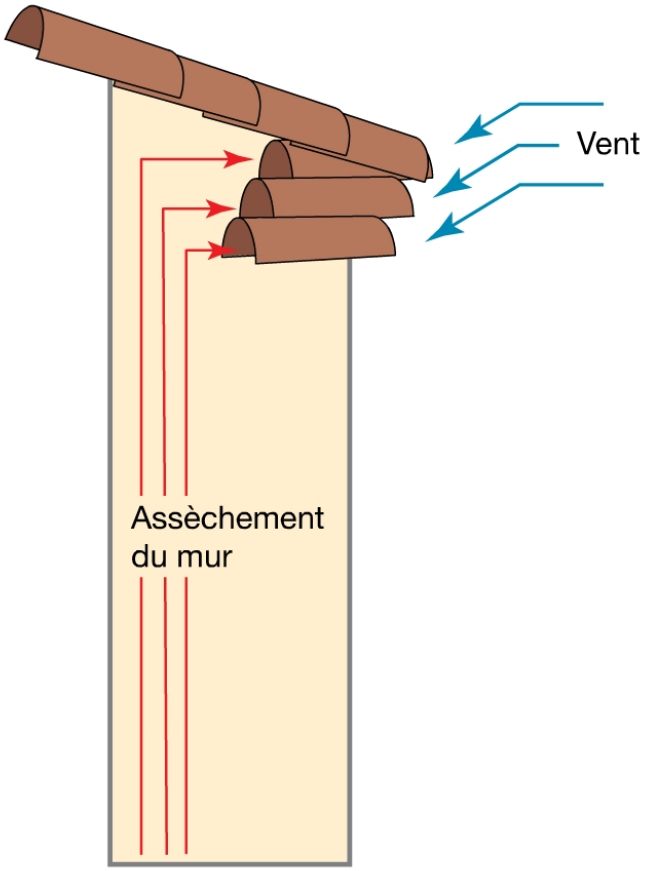
orages y dévalait une pente relativement étanche et venait imbiber le pied des constructions.

Les artisans de Gênes y vendirent (cher) leur savoir. Les maisons qui se trouvaient en bas de la pente arboraient des génoises bouchées tandis que celles qui recevaient toute l'eau de ruissellement des orages présentaient des génoises creuses. Le même souffle de vent asséchait davantage les parois les plus humides. Les longues tuiles épaisses utilisées furent fabriquées sur place, dans la plaine (elles dépassaient 60 cm de long et étaient épaisses de la largeur d'un pouce).

1590. Les « artisans locaux » observaient dubitativement ce nouveau système qui venait de si loin. Mais quand ils en eurent constaté les avantages, ils s'employèrent à le reproduire. Ils l'essayèrent d'abord ponctuellement dans une construction ou une autre. Ils édifiaient des *sailhens* constitués de « trois taulles l'un sur l'autre » formés de *thuiles.* Ils reproduisirent le procédé dans le Var (église de Rians), à Septèmes (1641), à Gardannes (1644)...

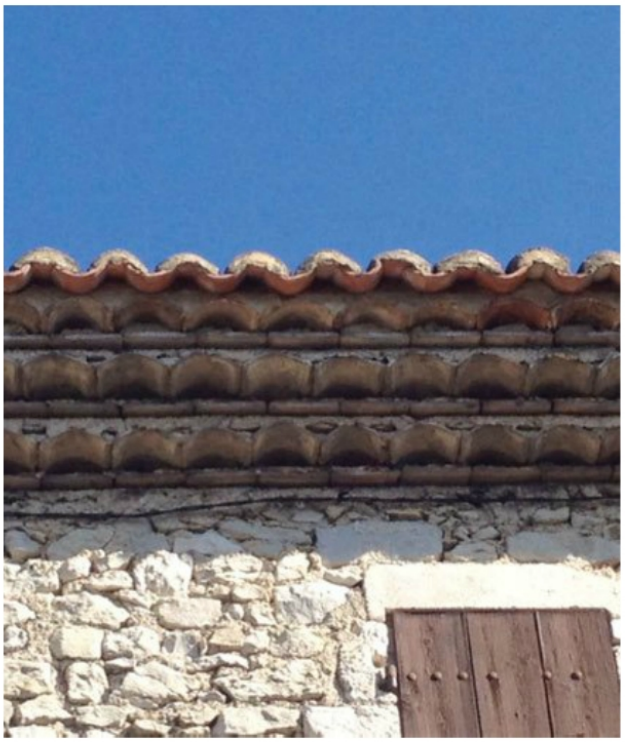
Le déclic se produisit lors d'une construction dans un village de la Sainte-Victoire. L'eau des orages y ruisselait sur la pente, comme à Vaison-la-Romaine. Le village s'appelait Puyloubier. Il surplombait la tristement célèbre plaine de Campi Putridi (où les corps de 200 000 Romains et Teutons auraient été abandonnés aux corbeaux après une horrible bataille). Un riche bourgeois voulait une bastide qui ne fût point trop humide. On construisit le haut des murs à la manière des Génois (« a la fasson qu'on appelle génoise »). Nous étions en 1645. Le client fut content du résultat. En 1648, il voulut construire une grange attenante. Il ordonna donc de nouveaux travaux. Dans la demande de devis (« prix-fait »), il précisa que les ouvriers devaient faire « les sailhens du couvert de la paillière a la genouvese semblable à ceulx que y sont ».

Copyright © 2016 Eyrolles.



Les génoises : une particularité des habitats en zones humides où sévit un vent fort, sec et fréquent. Le mistral assèche les tuiles des génoises (terre cuite = matière poreuse), créant une zone plus sèche, la chaux du mur homogénéise l'humidité au sein de tout le mur. Plus le mistral souffle, plus le mur s'assèche (et plus il est isolant).

La Provence était devenue le grenier à blé de l'Europe du Nord, laquelle souffrait les affres du Petit âge glaciaire. La noblesse redevenait riche. Les bourgeois d'Aix aussi. Le provençal s'était concocté le terme *genouveso* (« à la façon des Génois ») qui se francisait en *genouvese*. À partir de 1650, des génoises furent plantées en haut de toutes les parois (montées à la chaux) des nouvelles demeures fortunées construites sur des zones humides. Il fallait être riche pour s'offrir plusieurs rangées de génoises sous son toit. Ces gens ne dépensaient pas leur fortune par ostentation, mais parce qu'ils y trouvaient un intérêt.



Dans cette zone humide, on a multiplié les surfaces poreuses de la génoise. Les génoises creuses présentent une surface d'échange maximale avec l'air sec.

Les génoises pleines diffèrent des génoises creuses en ce sens que l'intérieur des tuiles est comblé à la chaux. Une génoise pleine assèche moins un mur qu'une génoise creuse (les tuiles s'assèchent moins pour le même souffle du mistral).

Copyright © 2016 Eyrolles.

Le confort quotidien en était certes largement amélioré, la pérennité du bâtiment aussi. On avait compris qu'une rangée de génoises asséchait moins le mur que deux ou bien trois. On mesura la différence de confort qui en résultait. Parfois on agrémentait certains murs ouest ou est, en surplomb de fenêtres, de quelques tuiles plantées, mais ce fut très rare. Souvent, on ne plantait qu'une rangée de tuiles ou bien on se contentait de n'en orner que les bâtiments d'habitation. Dorénavant, toute la zone de Provence soumise au mistral adopta la génoise, c'est-à-dire à peu près tout ce qui se construisit au sud de Valence, du Languedoc aux Basses-Alpes.

Il avait fallu le temps que les constructeurs locaux (« les mestres ») soient convaincus de l'efficacité de ces tuiles plantées dans les murs. Ils avaient attendu quelques générations pour s'assurer que les génoises ne fragilisaient pas le bâtiment à la longue. Ils avaient vérifié qu'elles ne constituaient pas un point faible qui aurait vieilli plus vite que le reste du bâti. Ils avaient appris à réparer une génoise cassée. Les artisans tuiliers avaient maîtrisé une production d'une qualité plus constante. Alors, alors seulement, ils avaient commencé à en généraliser le procédé. Ils avaient l'expérience et le savoir-faire.

L'Église catholique adopta la technique. Elle n'est pas réputée gâcher le denier public dans des solutions constructives hasardeuses. À partir du milieu du XVII^{e} siècle, tous les édifices religieux de Provence utilisèrent les génoises. Puis on les appliqua à tout le bâti neuf, jusque sur les pigeonniers, les bergeries… et même des lavoirs.

Et tout le peuple de Provence s'habitua à voir ces guirlandes de tuiles souligner les toits.

Avancées de toit

Même en été, la course du soleil ne se figeait pas au zénith. Les toits étaient les plus petits possible. Les grands murs captaient à plein les rayons solaires des mois froids, ils les recevaient aussi pendant les longues après-midi d'été. La solution n'était donc pas parfaite.

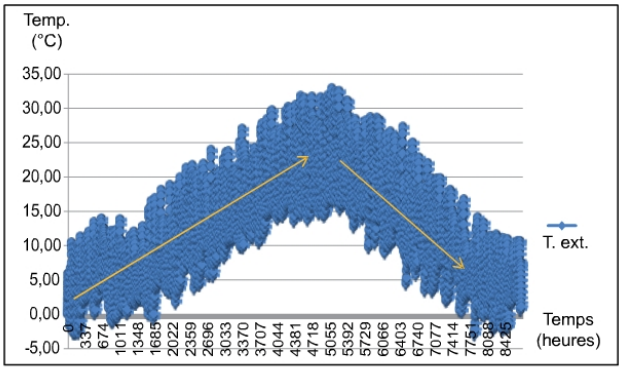
On pouvait mettre des ombrières. De nombreuses maisons de Provence étaient précédées d'auvents, généralement à l'ouest. Ces derniers permettaient de cantonner les enfants à l'extérieur de leurs habitats exigus pendant la journée, même durant les rares pluies. On savait créer des avancées de toit. Elles étaient calculées pour que les fenêtres hautes demeurent à l'ombre tout l'été.

On ne savait pas protéger efficacement deux ou trois étages des rayons du soleil avec des ombrières. Il aurait fallu des débords immenses offrant prise au mistral dévastateur. Par ailleurs, les auvents créaient autant d'ombre le 21 avril que le 21 août. En avril, on ne demande qu'à se réchauffer après l'hiver, alors qu'en août il fait encore terriblement chaud ! Les ombrières ne répondaient donc pas idéalement au problème. On fit appel à un procédé qui apportait de l'ombre pendant les canicules et qui laissait passer le rayonnement bienfaisant quand on en éprouvait le besoin : on utilisa les végétaux.

3. Les végétaux dans l'adaptation du bâti au climat

Une ombrelle végétale peut être remplacée par une ombrière structurelle amovible (canisses, roseaux, voiles, bâches), qu'on laissera à l'automne mais qu'on enlèvera au printemps.

Copyright © 2016 Eyrolles.



Évolution de la température et de l'amplitude thermique à Carpentras (84) sur un an. La courbe des températures baisse plus vite à l'automne qu'elle ne monte au printemps. Le plus chaud de l'année se trouve en juillet-août, pas en juin-juillet.

De l'avis de tous, l'arbre le plus efficace était le platane. Ses racines ne déstabilisaient pas les sols. Ses larges feuilles apportaient une bienfaisante opacité au soleil durant les mois chauds, elles disparaissaient toutes en hiver. Il supportait des tailles féroces. Bref, un ou deux sujets placés au sud d'une bastide apportaient tout le confort voulu : les murs se chauffaient au soleil durant les mois froids et restaient à l'ombre en été !

Le micocoulier s'avérait le plus efficient du point de vue thermique : il apportait une ombre encore plus fraîche. Mais sa croissance était encore plus lente que celle du platane. Et surtout, il présentait un défaut majeur : il ne supportait pas les tailles « courtes ». Ses branches faisaient trop d'ombre en hiver : elles ne laissaient passer que 55 % de l'irradiation solaire d'hiver à travers sa ramure quand un platane bien taillé autorisait 75 %.

Utiliser à plein l'intérêt bioclimatique d'un platane ou d'un micocoulier exigeait de la patience. Il fallait deux générations pour que la plantule ait poussé suffisamment pour protéger la bastide. L'expérience locale apporta une solution plus rapide. Une solution qui permettait au moins d'attendre que l'arbre fût suffisamment imposant pour produire son œuvre de tempérance bioclimatique.

La vigne vierge s'implante en trois ans sur un mur sud ou ouest. La première année, elle prend force. La deuxième, elle court à l'horizontale sur le mur qui la soutient. La troisième, elle part à l'assaut et va le couvrir. Elle a l'avantage (sur le lierre) de se fixer par de petites ventouses sur son support et de ne pas abîmer la maçonnerie. Son entretien est relativement simple : un peu d'eau vers son pied et une taille rigoureuse chaque année bien en dessous du niveau des génoises. Elle perd toutes ses feuilles en hiver et ne laisse sur le mur que des tiges fines. Du point de vue bioclimatique, son efficience est époustouflante. Entre une partie du mur qui serait au soleil et celle protégée par de la vigne vierge, la température de surface varie de 14 °C ! Aucune climatisation moderne n'offre un tel rapport qualité/prix. Cela paraît incroyable, pourtant…

Les feuilles se placent pour profiter de tous les rayons solaires. Elles forment un écran parfait devant le mur. Elles offrent une surface vernissée au soleil et chauffent donc peu. Elles respirent par leur autre face, apportant une évaporation rafraîchissante vers la paroi. Elles sont fixées à leur tige par de longs pédoncules. Entre le mur et les feuilles, ces derniers laissent passage à une lame d'air. Celle-ci se déplace continuellement vers le haut, emmenant un peu d'humidité avec elle. Le mur se trouve donc intégralement à l'ombre, rafraîchi par l'évapotranspiration des feuilles et un filet d'air continu. Les murs des bâtiments des champs se couvrirent donc unanimement de vigne vierge. Mais celle-ci a un défaut majeur : elle constitue le biotope favori d'une petite araignée rouge. Celle-ci pique les humains (particulièrement les nourrissons), mais elle ne supporte pas la chaux. On construisit donc des ouvrants dont les cadres furent soigneusement aplanis et lissés, même dans les habitats les plus pauvres. Chaque année, à la Saint-Jean, tous les Provençaux chaulaient l'intégralité du tour de tous les ouvrants. Ni les araignées rouges ni les fourmis ne passaient cet obstacle.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Au XVI^e siècle, les habitats des campagnes de Provence étaient hauts et étroits, leurs murs sud et ouest couverts de vigne vierge. Un siècle et demi plus tard, toutes les nouvelles constructions adoptaient la génoise. Le fait que ces dispositions soient généralisées ne doit rien au hasard. L'expérience des anciens avait sélectionné les meilleures parades bioclimatiques locales pour que les habitants vivent confortablement dans leurs maisons. Le regard de Viollet-le-Duc et celui d'un mestre du XVII^e siècle n'étaient pas les mêmes. Aucun des deux ne savait qu'assécher un mur en améliorait l'efficacité thermique selon une équation exponentielle. Tous deux ignoraient jusqu'à la signification de ce mot.

Le grand architecte du XIX^e avait repéré les caractéristiques constructives récurrentes. L'apparence qu'elles conféraient aux bâtiments reflétait la répétition des solutions bioclimatiques les plus efficaces, étant donné le climat local. Les habitants demandaient avant tout aux constructeurs des bâtiments agréables à vivre, hiver comme été. Aussi, génération après génération, les mestres avaient construit des bâtiments similaires. À force, tous les édifices de la même région arboraient une telle homogénéité que l'on parla de style provençal.

4. Une caractéristique du climat provençal : la rosée

La rosée du paysan

Le paysan était agriculteur et cultivait dans les collines, au sud de la Durance. Tous les matins, une fois mis son béret, il se livrait à un cérémonial immuable. Avant d'ouvrir la porte, il jetait un œil au baromètre. Puis, il sortait au soleil levant et regardait le ciel vers le sud tout en caressant le dessus d'une haute touffe verte qui poussait dans un grand pot. Il passait ensuite la main sur son visage et en appréciait l'humidité. Enfin, de l'autre main, il mesurait la dureté superficielle de la terre et la rosée du pied de l'herbe.

S'il était accompagné, il annonçait son verdict : « La rosée est bonne pour les carottes, ce matin », ou alors elle était bonne pour la luzerne. C'était un optimiste. Il commençait toujours sa journée par un sourire et « La rosée est bonne pour… ». Il fallait l'avoir côtoyé longtemps pour savoir que « la rosée est bonne pour les blés » n'était pas une bonne nouvelle.

Dans son exploitation, les brouillards étaient rarissimes. Les orages sévissaient quarante-cinq jours par an (il les marquait sur le calendrier des Postes). Ils étaient craints parce qu'ils emmenaient la terre en aval. C'est la rosée qui arrosait ses champs.

Depuis Aristote, on sait que la rosée se forme avant le petit jour, d'autant plus que la terre a été refroidie durant la nuit.

La rosée dans l'histoire des sciences

En 1814, Wells présenta sa théorie : « La rosée se forme par condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air lorsque, par suite du rayonnement froid nocturne, la température de la surface des objets situés près du sol descend sous le point de rosée de l'air ambiant. »

Abondance de la rosée

S'il n'y a pas de vent et que la nuit est claire (pas d'effet de serre dû aux nuages), plus la nuit est froide par rapport au jour (zones de fortes amplitudes thermiques quotidiennes) et plus l'humidité de l'air est élevée (arrière-pays provençal), plus la rosée sera abondante. Aristote avait raison : son sens de l'observation était légendaire.

Copyright © 2016 Eyrolles.

On en resta là jusqu'à ce qu'en 1956, l'Organisation météorologique mondiale édicte une nouvelle définition : « La rosée se forme lorsque les surfaces des objets se refroidissent au-dessous du point de rosée de l'air ambiant ; un tel refroidissement est dû à l'irradiation nocturne et la rosée se dépose principalement près du sol. »

En 1958, Monteith se servit d'une balance de précision. Il pesa terre et herbes. Il tira différentes conclusions de ses expériences. Le régime d'évaporation continue peu après le lever du soleil. Il existe un court moment de transition pendant lequel le poids total de l'échantillon diminue bien que de la rosée soit apparue sur la plante : il y a donc de l'humidité de l'air qui s'est condensée tandis que le sol s'évaporait encore. Si le vent est faible (< 0,5 m/s), le poids de l'échantillon reste constant, tandis que si le vent est plus fort, le poids de l'échantillon augmente. Dans ce dernier cas, la pellicule de surface de la terre est asséchée, bloquant son évaporation profonde. Les turbulences induisent donc un dépôt supplémentaire de la condensation de l'eau contenue dans l'air.

Puis Long a montré que, les nuits claires où il ne se forme pas de rosée au ras du sol, celle-ci abonde sur les hauts des plantes à tiges : la rosée est donc essentiellement d'origine atmosphérique. Au contraire, lorsque l'humidité dépasse 60 % et que les sols se sont bien refroidis durant la nuit, la rosée est surtout la résultante de l'évaporation des sols.

En Provence, le point de rosée se situe généralement entre 6 et 10 °C en dessous des maximales du jour : bien au-dessus des températures nocturnes de l'arrière-pays. La condensation est donc systématique : la rosée y est quotidienne et abondante.

À Venasque, au pied du mont Ventoux, un toit dégagé de 100 m² génère 15 à 30 litres de rosée par jour (sauf en hiver).

La rosée du bioclimaticien

Au grand étonnement de ses concitoyens, Aristote prétendait que l'air contenait de l'eau (et que sa condensation formait les gouttes de rosée).

Au cours de la nuit, sous un ciel clair que n'agite aucune perturbation, le sol est refroidi par son rayonnement infrarouge. Il transmet ce refroidissement à la couche d'air immédiatement supérieure, dont la température s'abaisse peu à peu.

À des altitudes très faibles (quelques mètres au-dessus du sol), on peut considérer que la pression atmosphérique reste constante. La quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air ne varie pas non plus, il n'en va pas de même pour sa pression partielle.

La masse de vapeur d'eau que peut contenir un mètre cube d'air chaud n'est pas la même que celle que peut contenir un mètre cube d'air froid. Le diagramme de Möller montre cette relation. À partir de la température du point de rosée, la vapeur d'eau se condense et se transforme en gouttelettes d'eau liquide.

Pour donner un exemple : le point de rosée d'un air à 20 °C contenant 80 % d'humidité relative se situe à 18 °C, alors que le point de rosée d'un air à 20 °C tombe à 10 °C si l'humidité relative n'est que de 25 %. En d'autres termes : si, dans une salle de bains à 20 °C, il y a 80 % d'humidité relative, il suffira que la surface interne de la vitre de la fenêtre atteigne 18 °C pour que l'on voie des gouttes d'eau se former sur le verre. Si cette pièce était restée inutilisée suffisamment longtemps pour que l'humidité relative y soit de 25 %, alors la condensation n'apparaîtra sur la vitre que si la température de la surface interne du vitrage est inférieure ou égale à 10 °C.

La nuit, la Terre reçoit infiniment peu de rayonnements qui la réchauffe ; par contre, notre planète va émettre de l'énergie par rayonnement infrarouge :

Copyright © 2016 Eyrolles.

environ 93 W/m². Tout comme un fer à repasser que l'on vient d'éteindre (il ne reçoit plus d'énergie) émet encore de la chaleur jusqu'à se refroidir complètement. La croûte terrestre émet donc encore de l'énergie lorsqu'elle ne reçoit plus d'irradiation : elle se refroidit. Cette fraîcheur se transmet à la mince couche d'air qui la surplombe. Cet air contient alors trop de vapeur d'eau étant donné sa température : il y a condensation. La rosée se dépose.

Évolution du sens du mot « confortable »

En 1760, « confortable » signifiait « où l'on se sent à l'aise » ; et « à l'aise » voulait dire « sans peine, sans gêne ». Le dictionnaire de 1786 donne cette définition de « confortable » : « qui contribue au bien-être ». En 2012 : « qui procure du confort. Un logement confortable. »

Copyright © 2016 Eyrolles.

4| La course du soleil

La réglementation thermique 2012 a introduit la notion de bioclimatisme. Ce coefficient « Bbio » ne doit pas dépasser la valeur cible de 48 pour les zones H2d et H3 (c'est-à-dire, le Sud-Est de la France).

Un architecte ne peut pas déposer une demande de permis de construire pour un bâtiment qui n'atteindrait pas ces valeurs. Cette décision politique a inspiré différentes conceptions du besoin bioclimatique.

- Architecte : Une contrainte de plus ! Encore un frein à la créativité artistique !
- Administratif : L'introduction du Bbio n'annule pas les règlements antérieurs. Les architectes n'ont qu'à se débrouiller.
- Bon sens : On va orienter les bâtiments en fonction des apports naturels, pas du tracé des routes.
- Chauffagiste : Encore un truc pour diminuer la taille des chaudières !
- Écologiste : On sait bien que les rayons solaires chauffent aussi les constructions.
- Futur propriétaire : Un coût supplémentaire pour le bâtiment, le salaire d'un ingénieur thermicien et du temps administratif en plus.
- Historien : Le Bbio correspond à peine aux connaissances des Murébeytiens (– 8500).
- Lotisseur : Comment ça ? Le plan du pavillon type devra s'adapter à son orientation ?
- Ingénieur : Le Bbio prend en compte les besoins de chauffage, de refroidissement et d'éclairage artificiel.
- Visionnaire : Une nouvelle ère commence, celle des bâtiments autosuffisants en énergie.

Le Bbio favorise les bâtiments qui bénéficient d'une conception de qualité prenant en compte la compacité du bâti, son orientation, la répartition des surfaces de vitrage et les niveaux d'isolation. Le Bbio repose donc sur le travail et l'imagination des architectes.

La créativité qui leur est demandée va exiger un travail de conception beaucoup plus complexe. C'est sur les architectes (et les ingénieurs des bureaux d'études) que repose l'optimisation de la consommation des bâtiments du futur. On leur demande de tenir compte de la course du soleil pour diminuer les besoins énergétiques.

BBIO = besoin climatique

« Dès 2011 pour un bâtiment tertiaire et 2013 pour un bâtiment d'habitation :
le concepteur doit fournir dans ses projets : la preuve qu'il a bien intégré les nouvelles exigences d'efficacité énergétique minimum. Par exemple en déposant une note de calcul sur le Bbio et le confort d'été (TIC) dès la demande de permis de construire. »

Copyright © 2016 Eyrolles.

Le Bbio prenant en compte les besoins de chauffage comme ceux de la climatisation, les bâtiments sont supposés se chauffer au soleil l'hiver, mais s'en protéger l'été. Précisément ce que font les constructions qui ont été édifiées avant les deux guerres mondiales.

1. Quelques corollaires erronés

Nos enseignants nous ont transmis quelques approximations, les conclusions qu'on en a tirées sont parfois source d'erreur. En voici quelques exemples :

Exemple 1 : le soleil culmine le 21 juin, c'est donc le jour le plus chaud. Faux ! Le soleil est au plus haut le 21 juin, mais c'est le 5 août que se situe habituellement le jour le plus chaud de l'année, dans l'hémisphère nord. La croûte terrestre a une masse colossale, il lui faut du temps pour se réchauffer. Il y a donc un décalage entre la position du soleil et la chaleur ressentie. De même, le 21 janvier, la Terre a été refroidie par l'hiver, il y fait statistiquement plus froid que le 21 décembre.

Exemple 2 : le soleil atteint son apogée à midi, donc c'est le moment le plus chaud de la journée. Faux ! L'heure légale n'est pas la même que l'heure solaire. L'heure vraie (c'est-à-dire, l'heure solaire) est égale à l'heure de la montre corrigée de l'équation du temps et prenant en compte la correction due à la longitude. Autrement dit, l'heure vraie prend en compte l'inclinaison de la Terre ainsi que sa position sur l'ellipse que parcourt notre planète par rapport au soleil. À Pernes-les-Fontaines (84), midi à l'heure légale d'été correspond à 13 h 40 à l'heure solaire, le 21 juin. Donc, le soleil n'atteint pas son apogée à midi, heure légale.

À noter

Le 4 juillet est le jour de l'année où l'ellipse de la planète Terre l'éloigne le plus du soleil.

Canicule

Lorsque Sirius, celle qu'on appelait « l'étoile du chien », apparaît à l'horizon peu avant le lever du soleil, entre le 19 et le 21 juillet, elle annonce la canicule (de canis = « chien »). Le 21 juillet, pas le 21 juin.

Le 21 juin, il fait plus chaud à quatre heures de l'après-midi (heure solaire) qu'à huit heures du matin (heure solaire), pourtant le soleil atteint son apogée à douze heures, exactement à mi-distance. Tout Provençal vous confirmera qu'il fait généralement plus chaud lorsque sa montre affiche 17 h 40 plutôt qu'à 9 h 40 du matin. Donc, le moment le plus chaud de la journée ne se situe pas à midi heure solaire mais plus tard.

Pourquoi le maximum de chaleur ressentie ne correspond-il pas à l'apogée du soleil ? Parce qu'au lever du soleil, l'air a été refroidi par la nuit. Il est plus dense. La croûte terrestre a abandonné des calories. La rosée s'évapore doucement. Au ras du sol, l'atmosphère est froide et humide. Le matin, il y a donc plus de molécules d'eau, d'azote et d'oxygène, dans le même volume d'air, que l'après-midi. L'irradiation du soleil au petit matin, rasante, traverse une grande quantité d'atmosphère. Les rayons, freinés par toutes ces molécules en suspension, mettent un petit peu plus de temps à atteindre le sol (une vieille histoire de mouvement brownien) : le soleil chauffe moins que l'après-midi où, selon le même angle, les rayons traversent un air sec. Ce phénomène de « soleil faible du matin » est particulièrement marqué dans les régions où l'humidité de l'air dépasse les 50 % toute l'année (Provence).

À l'inverse, en fin de journée, l'air est plus chaud donc plus léger. L'humidité s'est évaporée. Moins dense, l'atmosphère facilite l'effet calorifique de l'irradiation solaire (« soleil fort de l'après-midi »). En conséquence, la façade occidentale d'une

Copyright © 2016 Eyrolles.

maison est plus réchauffée par les rayons solaires que son mur oriental.

Exemple 3 : c'est quand le soleil est perpendiculaire à une vitre qu'il réchauffe le plus le logement. Faux ! Le verre d'une fenêtre classique a un effet réfléchissant. Lorsque le soleil lui est exactement perpendiculaire, le vitrage reflète une part non négligeable de son énergie. Contrairement à une idée reçue, ce n'est pas plein sud que l'ensoleillement est maximal sur un vitrage vertical. Cette réflexion (effet vitreux) diminue très rapidement et devient pratiquement nulle dès lors que l'on s'écarte de 15° par rapport au sud.

Plus on s'approche du 21 juin, plus la réflexion vitreuse d'une fenêtre située au sud sera importante. À cette date, 30 % du rayonnement est réfléchi à midi (heure solaire). Par contre, une fenêtre de toit offre un angle incident différent au soleil. L'énergie reçue sur un vitrage incliné entre 15 et 45° est environ le double de celle sur un verre vertical. En Provence, la pente des toits est généralement de 18° : un Velux® sur la pente nord laisse pénétrer à peine 14 % de chaleur en moins que s'il était installé sur la pente sud.

Les rayons solaires chauffent

Le soleil rayonne la plus grande partie de son énergie dans les hautes fréquences. Les rayons solaires quittent l'astre à une température de 5 500 °C.

La lumière visible représente 46 % de l'énergie totale apportée sur Terre par les rayons. 49 % du rayonnement énergétique émis par le soleil se situe au-delà du rouge visible, dans les infrarouges. C'est ce rayonnement que nous ressentons comme une onde de chaleur. Le reste du rayonnement, émis hors du spectre visible, l'est dans des longueurs d'onde inférieures : les ultraviolets.

À l'équateur, les rayons arrivent perpendiculairement au sol ; ils sont plus chauds, puisqu'ils ont traversé une moindre épaisseur d'atmosphère. Plus on s'éloigne vers les pôles, plus les rayons ont été réfléchis par les molécules de l'air et moins ils réchauffent le sol.

Pour mémoire : au solstice d'été (21 juin), le soleil est perpendiculaire au tropique, alors qu'il est perpendiculaire à l'équateur aux équinoxes (21 mars et 21 septembre).

2. La course du soleil

À la latitude de 44° nord (Avignon), le soleil chauffe sur 250° en été. Il se lève au nord-est-est (NEE) et se couche au nord-ouest-ouest (NOO).

À l'équinoxe d'hiver (21 décembre), il se lève au sud-est (ESE) et se couche 120° plus tard, au sud-ouest (OSO). Les deux premières heures du jour, les rayons sont si rasants et l'humidité si importante qu'ils n'apportent pratiquement pas de chaleur. C'est pourquoi on considère qu'ils ne chauffent efficacement une paroi verticale que sept heures par jour, soit pratiquement de 9 h 15 à 16 h 15 (80°). En Provence, 90 % de l'apport d'énergie sur les surfaces verticales intervient entre 9 h 30 et 15 h solaire. Les mestres interdisaient tout ce qui pourrait masquer le soleil sur les 90° au sud d'un bâtiment (de sud – 45° à sud + 45°).

En d'autres termes : le soleil de l'après-midi chauffe efficacement jusqu'à 45° à l'ouest du sud en hiver, alors qu'il brille jusqu'à 120° du sud en été. Donc, la course du soleil entre 45° ouest et 120° ouest ne chauffe les bâtiments qu'en été, justement quand on « souffre » des excès de chaleur. De son lever à son coucher, à mesure que le soleil tourne d'est en ouest, il s'élève jusqu'à son azimut, puis redescend.

L'angle par rapport au sol (élévation du soleil) et l'angle par rapport au nord définissent la trajectoire du soleil. Un relevé par mois donne un diagramme comportant sept courbes. Il résulte des diagrammes solaires ci-contre qu'un bâtiment est

Copyright © 2016 Eyrolles.

La composition du spectre solaire

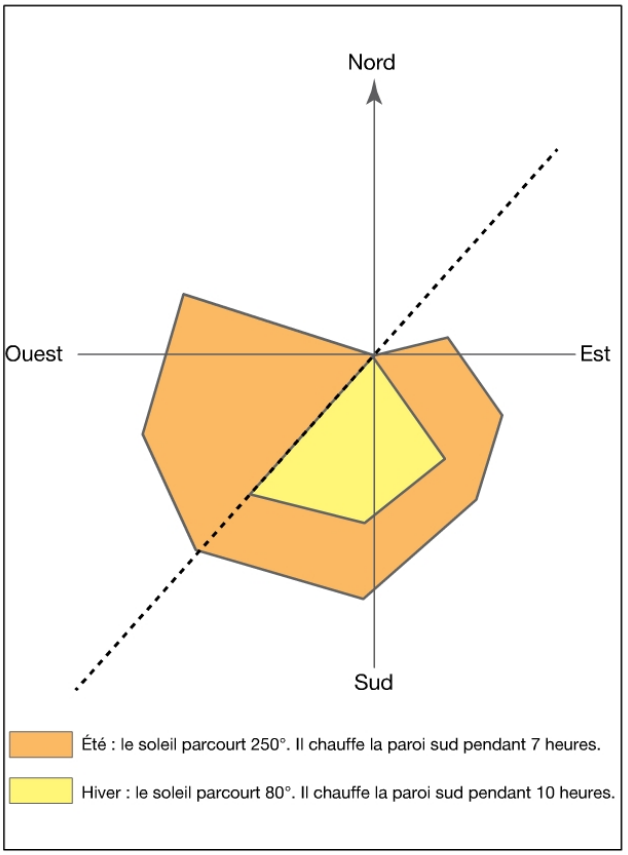
Elle se trouve modifiée à mesure que l'angle de pénétration des rayons solaires dans l'atmosphère baisse.

Le mouvement brownien ralentit plus les radiations des grandes longueurs d'onde (les infrarouges) que celles des courtes longueurs d'onde (les ultraviolets). Plus la date s'approche du 21 décembre, plus le spectre lumineux est riche en bleus.

Par ailleurs : plus l'incidence s'approche de la tangente du globe (plus les rayons solaires sont rasants), plus la luminosité diffuse sera importante. À Carpentras : en décembre-janvier, la luminosité diffuse irradie légèrement plus d'énergie que la luminosité directe, alors qu'en juin-juillet, la luminosité directe est 66 % plus importante que la luminosité diffuse.

La lumière diffuse irradiant plus dans les ultraviolets, le spectre de la lumière d'hiver est plus bleuté que celui de l'été (les couleurs « froides » sont celles qui tirent vers le bleu, tandis que les couleurs « chaudes » sont celles qui tirent vers le rouge).

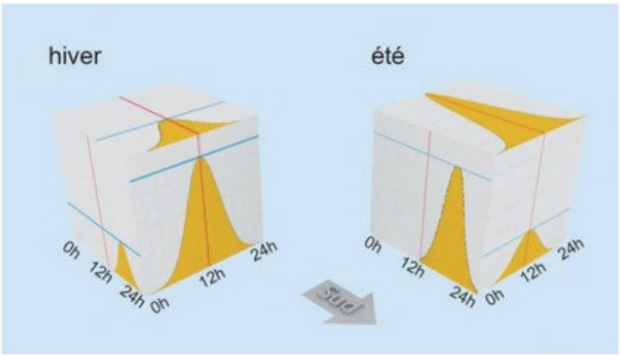
Entre 30 et 45° de latitude, les façades souhaitent capter la chaleur de l'irradiation d'hiver, elles affichent des couleurs riches en rouge orangé sombre (ocres…), opposées aux bleus.



Comparaison entre la course du soleil sur une journée en été et en hiver. Une maison du Sud de la France cherchera à se protéger des rayons solaires de 45° à l'ouest du sud (« ouest – 45° ») à 120° à l'ouest du sud (« ouest + 30° ») : le soleil n'y chauffe pas en hiver quand on en a besoin, il ne chauffe qu'en été quand il fait déjà trop chaud.

surtout chauffé sur son toit en été, et qu'à cette période, sa façade ouest reçoit plus de rayons que celle orientée au sud. Alors qu'en hiver, c'est la façade sud qui reçoit l'essentiel de la chaleur. Le toit en perçoit aussi un peu ; les autres parois ne sont pratiquement pas chauffées.

Protéger le toit du rayonnement d'été peut se faire de différentes manières. La plus en vogue est l'isolation. À base de fibre de bois (ou cellulose), elle a l'avantage d'assurer en même temps un déphasage intéressant. En été, les Provençaux ventilaient les plafonds ou, dès qu'ils le purent, les combles. La façade sud était protégée l'été par de la vigne



Si l'on assimile un bâtiment à un cube : quand on a froid, la chaleur de l'irradiation arrive surtout sur la façade sud. Quand on a chaud, la chaleur de l'irradiation arrive surtout sur le toit (et la façade ouest).

Copyright © 2016 Eyrolles.

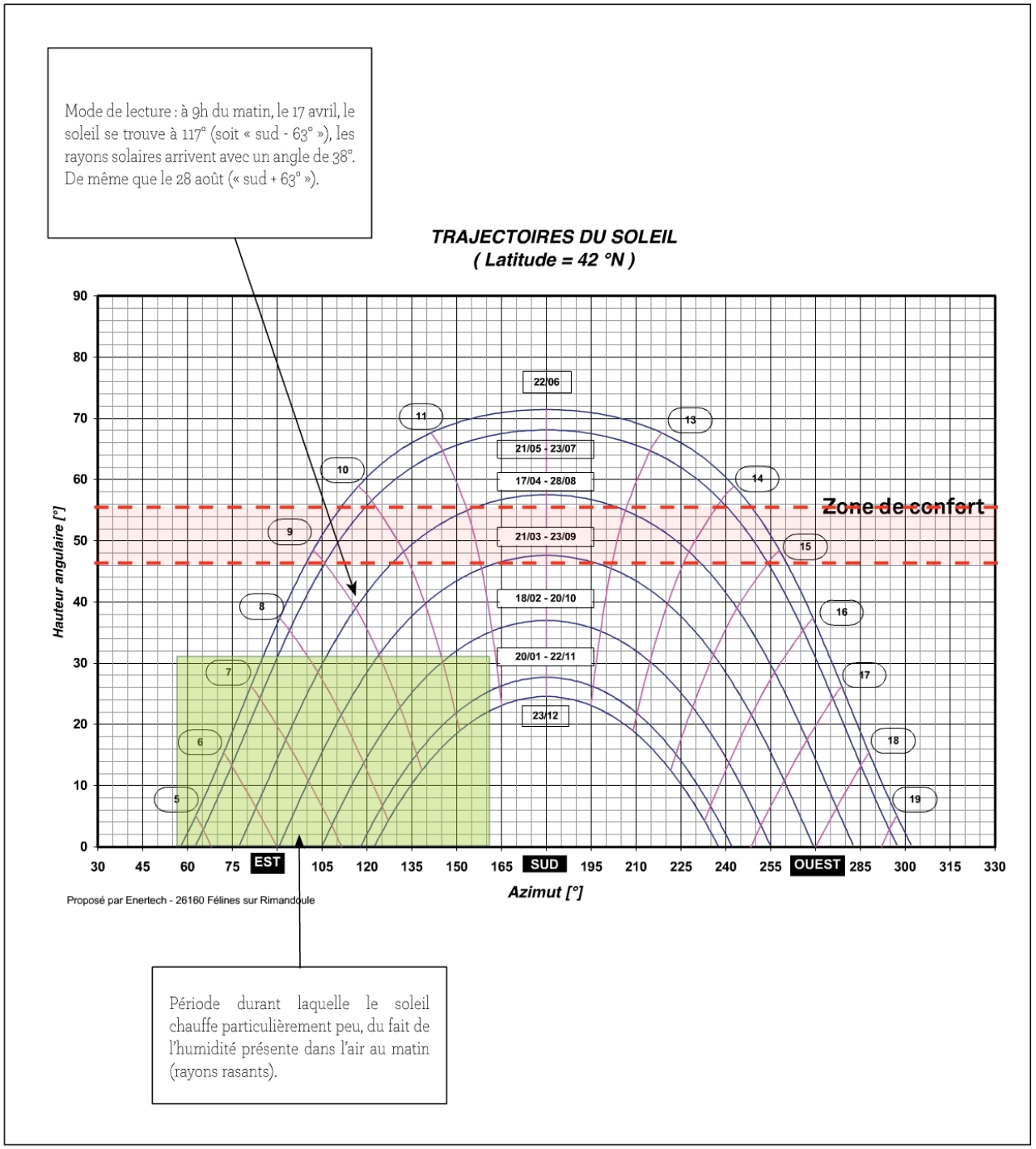


Diagramme solaire : trajectoire du soleil à la latitude 42°N.

Copyright © 2016 Eyrolles.

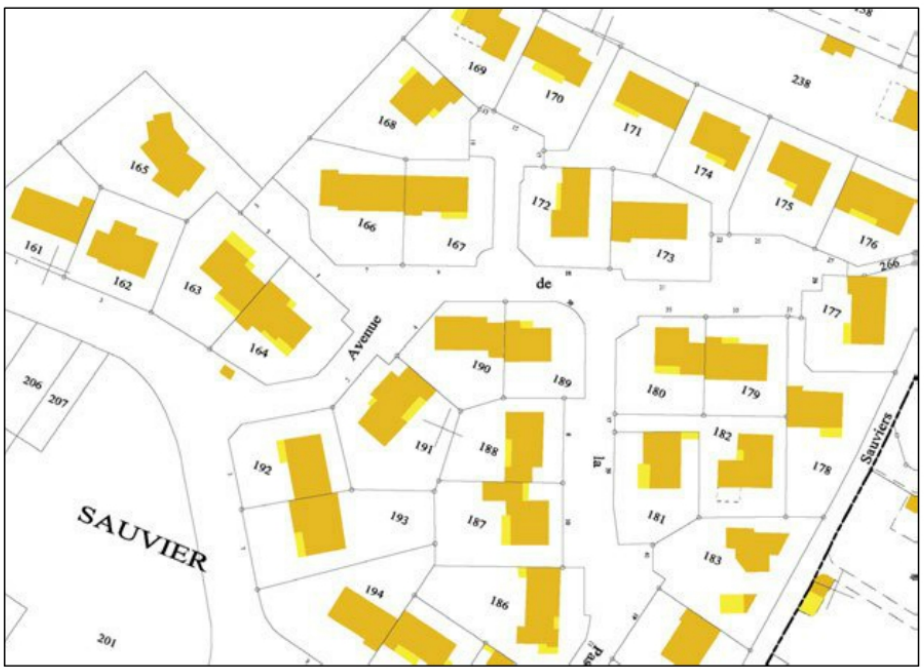
Déperdition d'une paroi

Le coefficient moyen de déperdition d'une paroi varie de 1 à 10 : entre 0,2 (paroi bien isolée) et 2 W/m².K pour une paroi non isolée. Or, dans l'arrière-pays provençal, l'écart moyen de température entre l'intérieur et l'extérieur d'une paroi est de l'ordre de 13 °C, durant la période de chauffage. Donc, chaque mètre carré de paroi laisse s'échapper entre 2,6 et 26 W d'énergie. Et, durant les mois froids, chaque jour, une paroi sud de couleur ocre reçoit entre 200 et 1 000 W/m² de l'irradiation solaire. Donc, en Provence, le bilan d'une paroi orientée au sud est toujours positif, puisque, même au plus froid de l'hiver, elle reçoit nettement plus d'énergie qu'elle n'en perd.

vierge (qui la climatisait) ou par l'ombrage d'un platane. Elle était toujours dégagée de tout ombrage en hiver. Il n'y avait pas de fenêtre à l'ouest, tout au plus un fenestreau avec volet qui donnait sur une pièce tampon : la grange. Au nord, un ouvrant minuscule éclairait vaguement le cellier.

À noter

Le soleil du matin chauffe théoriquement à partir de 60° est, en hiver (60° est = sud – 30°). Durant les mois froids, la grande amplitude thermique (14 °C) condense beaucoup d'eau dans l'atmosphère. L'irradiation, rasante, en est affaiblie. Un Provençal ne perçoit pas la chaleur d'un soleil d'hiver sur la peau de son visage avant 10-11 h du matin, soit trois heures après l'aurore.



Zones pavillonnaires à Montélimar (26). Actuellement, dans ce type de zone, les façades sont alignées sur les rues et non selon l'orientation au soleil, contrairement au bon sens bioclimatique. Extrait du cadastre. Source : Direction générale des finances publiques – Cadastre. Mise à jour 2015.

Copyright © 2016 Eyrolles.

PARTIE 2

LES SOLUTIONS

Une bonne part des savoirs acquis par nos anciens est maintenant largement négligée. Tant d'expérience, tant de savoir-faire qui ne sont plus enseignés aux constructeurs d'aujourd'hui et dont vous trouverez douze exemples dans les pages qui suivent.

Nous avons choisi de présenter successivement deux solutions pour chacun des six besoins suivants : chauffer, tempérer le logement, apporter de la fraîcheur, concevoir les parois, économiser l'énergie, réguler l'humidité. Ces solutions bioclimatiques correspondant aux climats du Sud de la France, il a été ajouté un treizième chapitre traitant d'une caractéristique fondamentale du climat sous ces cieux : le vent.

La plupart des douze solutions bioclimatiques présentées ici sont inhérentes à la conception structurelle des bâtiments. Elles ont été sélectionnées parce que la logique qui a abouti à leur mise au point peut aussi être utilisée avec des matériaux plus facilement disponibles aujourd'hui.

Copyright © 2016 Eyrolles.

5| Chauffage

Nous, et ceux qui nous ont instruits, avons été habitués à consommer tant d'énergies fossiles que nous avons oublié comment nos aïeux faisaient pour se chauffer en utilisant le soleil d'hiver. En combinant la conductivité des matériaux lourds et une isolation primaire, on peut préchauffer la structure d'un bâtiment. Si on dispose d'arbres caducs, le « mur capteur » sera la solution la plus simple. Si on souhaite un chauffage beaucoup plus puissant, la rampe captrice sera mieux adaptée, l'associer à une réserve d'énergie sous la forme d'une réserve d'eau pourrait permettre à un bassin de rester à 25 °C toute l'année (stockage transsaisonnier).

SOLUTION BIOCLIMATIQUE 1. MUR CAPTEUR

1. Le Généralife

Vers 800 de notre ère, l'armée du califat des Omeyyades, partie du Maroc, conquit l'Espagne et progressa à toute vitesse vers le nord jusqu'à ce que Charles Martel et le duc d'Eudes les arrêtent à Poitiers. Ces guerriers arabes développèrent un royaume époustouflant en Andalousie. Leur cour accueillit la fine fleur des sciences et des arts de l'époque, sans distinction de race ni de religion. En 1238, la dynastie régnante du moment, les Nasrides, entreprit de construire le plus beau palais de l'Europe médiévale : l'Alhambra de Grenade. Face à ce joyau, sur une colline donnant au sud, ils avaient planté des vergers. Le nord et l'est de ce monticule donnaient sur un précipice de 120 m au-dessus d'une rivière : le Dario.

En 1319, les températures du monde plongeaient vers le Petit âge glaciaire. À 1 000 m d'altitude, à proximité immédiate des neiges éternelles de la Sierra Nevada, il ne s'agissait plus de gérer uniquement les canicules d'été : il fallait trouver un système de chauffage. Le sultan ne se contentait plus des braseros éparpillés dans son palais. Il donna carte blanche à ses architectes pour remodeler son lieu de villégiature, en haut de la colline, face à l'Alhambra. Cet endroit avait été aménagé en jardins qui représentaient le paradis d'Allah. On l'appelait Yanat al-Arif, ce qui, en arabe, signifie « le jardin de l'architecte ».

Les architectes du sultan privilégièrent le point haut où un système de norias amenait l'eau en abondance. C'est là que se trouvait le pavillon où aimait aller le sultan. À l'est du bâtiment, un long

Copyright © 2016 Eyrolles.

mur isolait un grand jardin réservé aux femmes du harem. L'endroit était protégé au nord et à l'est par la falaise sur la gorge du Dario et à l'ouest par la forteresse de l'Alhambra. Les fleurs embaumaient les jardins du Généralife, les arbres fruitiers avaient plus de soixante ans, les oiseaux volaient de partout enchantant les lieux. Le sultan aimait à s'y promener pour ses longues méditations, les femmes du harem aussi.

Le mur du Généralife traversait tout le pavillon, sur les deux étages, soit 7 m de haut. Il était porteur, ce qui expliquait qu'il fût fort, mais ses dimensions dépassaient l'entendement : il mesurait 94 cm d'épaisseur au faîte (deux coudées). Aucune porte ne le traversait. Il délimitait deux zones : au sud-sud-est, les salons de réception et les cuisines ; au nord-nord-ouest, les appartements privés du sultan. Pour passer de l'une à l'autre, les architectes avaient construit un escalier en sous-sol. On descendait une quinzaine de marches, parcourait une plate-forme sous le mur, et on remontait autant de marches d'un escalier qui ne mesurait que trois coudées de large. Un eunuque de chaque côté suffisait à sécuriser les appartements du sultan. Ce mur se prolongeait vers l'est.

Lorsqu'en 1492 les Espagnols reprirent possession de leurs territoires et du Généralife, ils s'étonnèrent des dimensions hors normes de ce mur. Aucun ennemi n'aurait pu escalader cette muraille défensive, étant donné sa hauteur au-dessus de la gorge, et on ne voyait pas pourquoi les Arabes l'avaient édifiée aussi épaisse. L'endroit dominait de cent vingt mètres le Rio Dario. La colline opposée, plus basse, était distante d'un bon kilomètre. Aucun projectile n'aurait pu lui arriver de face. Il n'y avait aucune raison apparente de construire une muraille à cet endroit. Comment appeler autrement un mur de 7 m de haut et de 1,40 mètre d'épaisseur au pied, construit de lourdes pierres assemblées au mortier, sur 60 m de long !

La face nord ainsi que la tranche supérieure avaient été recouvertes de roseaux et d'une épaisse couche d'enduit lissé à l'huile. Les vents froids qui provenaient de la Sierra Nevada glissaient sur cet obstacle sans aspérité. La grande hauteur de la muraille, additionnée à celle de la combe, accélérait tellement le vent qu'elle en projetait les turbulences bien au-delà du jardin que protégeait le mur. Son faîte arrondi limitait les tourbillons d'air. Sa face sud avait simplement été enduite d'une terre ocre.

Grenade connaît des hivers froids parce qu'elle est élevée en altitude, mais ceux-ci sont très ensoleillés. En hiver, les feuilles des arbres du Généralife tombaient et laissaient passer les rayons du soleil hivernal presque horizontaux qui tapaient de toute leur énergie sur la muraille. Sa couleur ocre lui permettait d'en emmagasiner toutes les calories sur la face sud du mur, tandis que la face nord était isolée avec des roseaux. Donc cette énergie était soit irradiée vers le jardin soit transmise par conductivité, de pierre en pierre, tout au long de la maçonnerie jusqu'au mur central du palais, lequel diffusait cette chaleur à l'intérieur du bâtiment. Cet immense radiateur fonctionnait par inertie. Plus l'air était frais, plus il relâchait de thermies. Étant donné son épaisseur, il régnait toujours une température douce dans le palais. En été, la façade de la muraille restait perpétuellement à l'ombre des arbres et les fontaines d'eau froide arrosaient la pierre des escaliers : le mur apportait un peu de fraîcheur au bâtiment.

Les architectes du sultan avaient trouvé une parade au refroidissement des températures moyennes de la Terre. Cette technique ne consommait aucune énergie. Elle ne dépendait que de la chute des feuilles des arbres du jardin. Les années plus froides, elles tombaient plus tôt ; les années plus chaudes, elles profitaient du soleil plus longtemps, contribuant à rafraîchir le palais du Généralife. Le sultan pouvait profiter de son patio quelle que fût la saison.

Copyright © 2016 Eyrolles.

État des lieux

Topographie

Au nord : une falaise de 120 m, vue imprenable sur les champs en espalier de l'autre côté de la gorge (courant de l'ouest vers l'est). Au loin, barrant l'horizon, les neiges éternelles de la Sierra Nevada (3 842 m d'altitude), d'où un vent gélif mais faible arrivait sur le pavillon chaque hiver.

À l'est : une falaise, puis une pente escarpée, y compris un chemin muletier.

Au sud : des terrasses de vergers et de jardins. Les restanques mesuraient jusqu'à cinq mètres de hauteur. Vue sur la chaîne de l'Alpujarra.

À l'ouest : au-delà des vergers, vue sur les murailles et le palais de l'Alhambra, chemin carrossable, accès du sultan et des femmes du harem.

Climat

Le printemps et l'automne étaient très brefs. L'été, long, arborait des températures moyennes de 25 °C, ce qui supposait une douzaine de pics diurnes supérieurs à 40 °C (à l'ombre). La température moyenne des hivers (en 1319) approchait les 5 °C et, chaque hiver, plusieurs nuits connaissaient le gel. Il pleuvait 474 litres d'eau au mètre carré par an, par épisodes longs et copieux concentrés entre octobre et mai. Il y avait au moins trois cents jours de ciel clair par an. Le vent dominant provenait du nord-ouest, il soufflait à moins de cinq nœuds, mais accélérait dans la gorge du Dario. Les vents forts soufflaient du sud, exclusivement de décembre à février (venant de la Méditerranée, ils apportaient de la chaleur au cœur de l'hiver, mais soufflaient jusqu'à neuf nœuds). Le climat se refroidissait nettement depuis trois générations.

Contraintes client

Le sultan souhaitait vivre dans une maison confortable été comme hiver. Il appréciait particulièrement la vue des fleurs et le chant des oiseaux. Il aimait contempler, de sa chambre, le lever de soleil et la vue sur les neiges de la Sierra Nevada. Le sultan recevait dans sa maison, mais ses appartements privés devaient être isolés et avoir un accès direct au harem. Par-dessus tout : la vie du sultan devait être facile à protéger. Contraintes administratives et réglementaires : il n'y en avait aucune. Le sultan avait ordonné que le « jardin de l'architecte » fût reconstruit. Cela valait tous les passe-droits.

Budget

Illimité.

Solution

Ils construisirent un mur.

Les caractéristiques du mur

Les rois catholiques qui s'installèrent au Généralife, ne comprirent pas la fonction du mur de restitution thermique. Ils pensaient que ce mur était défensif et demandèrent à leurs architectes d'y faire de grandes ouvertures pour profiter de la superbe vue sur les montagnes.

Des architectes espagnols étaient arrivés avec les rois catholiques. Ils pensèrent d'une muraille qu'elle interdisait l'escalade du versant par d'éventuels soldats. Ils regrettèrent de ne pas profiter de cette superbe vue : au-delà de la gorge, l'œil aurait pu balayer les neiges éternelles soulignant le ciel généralement bleu. Un jour, on estima qu'il n'y avait plus d'ennemis à craindre. Dans ce mur épais, on fit ouvrir de très grandes baies. Soucieux de ne pas abîmer le lieu, les architectes espagnols firent appel à des artisans qui avaient travaillé pour les Arabes. Vers le sud, on appuya un bâtiment de deux étages. La construction en fut soignée. Le style du palais fut respecté. On profita de la vue.

L'air froid de la Sierra Nevada se mit alors à traverser les baies. Quand les feuilles avaient

Copyright © 2016 Eyrolles.

abandonné les arbres, le mur capteur s'échauffait mais, avant d'atteindre le palais, il traversait le bâtiment de deux étages : il y lâchait ses calories. Privé de celles-ci, l'intérieur du palais se fit froid en hiver. Les orangers du patio n'y résistèrent pas : tous moururent. Personne n'avait compris que l'efficacité thermique du patio avait été détériorée. Les architectes arabes n'étaient plus là pour l'expliquer. Malgré leur respect des lieux, les envahisseurs les avaient abîmés. Les Espagnols, à cette époque, ne connaissaient pas encore les particularités du climat local. Ils avaient voulu embellir, selon leurs critères de Madrilènes. Ils s'étaient arrêtés à la fonction défensive du mur. Ils n'avaient pas pensé que celui-ci protégeait cette partie du palais du vent du nord, ils n'imaginaient pas qu'il puisse servir de chauffage réversible au Généralife. Les plantes n'y supportaient plus les températures d'hiver. Elles gelaient. À chaque printemps, les jardiniers couvrirent le patio de plants de fleurs. Les souverains espagnols n'utilisèrent plus l'endroit que comme palais d'été. Les mois froids y étaient devenus invivables.

Dans le patio, les envahisseurs espagnols firent la même erreur. Il y avait une avancée de toit, sur le côté est, au-dessus d'une rangée continue de rosiers grimpants. Ce mur (orienté sud-ouest) recevait la chaleur du soleil de l'après-midi. Les tuiles y avançaient (bizarrement) vers le haut : elles pointaient vers le ciel selon un angle de 45°. L'avancée de toit faisait de l'ombre à toute la surface du mur quand, en été, le soleil culminait à 74°. Mais, au solstice d'hiver, l'angle de ses rayons descendant jusqu'à 35°, il chauffait l'intégralité du mur rouge. Les architectes espagnols n'envisagèrent pas cette logique thermique. Ils jugèrent, avec raison, que cette avancée de tuiles protégeait mal des (rares) pluies et l'abattirent. À la place, de chaque côté du patio, ils construisirent deux galeries couvertes. Elles reliaient l'entrée du patio au palais. Elles étaient légères : à la place des murs, ils avaient édifié de fines colonnes laissant admirer la vue de part et d'autre. Pour que l'espace ne donnât pas l'impression d'être trop rétréci, ils peignirent les murs à la chaux blanche.

En hiver, le vent gelé passait entre ces arches et les murs reflétaient l'irradiation solaire au lieu de la capter. L'équilibre thermique était détérioré ! À leur tour, tous les citronniers du patio moururent de froid.

Matériaux

Les architectes du sultan disposaient de peu de ressources. Nous étions en 1319, l'époque de Marco Polo. Pour transmettre la chaleur par conduction, les technologies de l'époque différaient peu de celles qu'avait léguées Rome : on empilait les pierres des murs en tentant de créer un maximum de points de contact entre les pierres. On utilisait un mortier de chaux pilé et repilé pour que sa structure devienne la plus proche possible de celle de la pierre après séchage.

Le meilleur isolant dont on disposait était le roseau. Il n'isolait vraiment qu'écrasé en une couche dense. Son comportement thermique se révélait donc efficace pour isoler les sols, il l'était nettement moins pour isoler des parois verticales. On avait beau lier les bottes de roseaux serrées et les ancrer dans le mortier, il fallait de grandes épaisseurs pour obtenir une résistivité thermique performante. Chaque fenêtre, même fermée, représentait une énorme fuite thermique. On ne savait limiter l'entrée d'air froid dans un bâtiment qu'en restreignant ses ouvertures. Les architectes d'aujourd'hui disposent de matériaux considérablement plus performants. La plupart des isolants affichent des performances thermiques remarquables : leur λ avoisine 0,04 kWh/m².s.

Les PVC, verre, joints, colles et enduits employés en construction atteignent des niveaux de performance dont n'auraient pas rêvé les architectes du sultan les plus imaginatifs. Vis, boulons, niveaux,

Copyright © 2016 Eyrolles.

scies, perceuses, pelleteuses ou autres outils nous offrent des possibilités dont ils ne disposaient pas.

Mais les métaux utilisés dans les constructions d'aujourd'hui (acier, cuivre, aluminium) conduisent beaucoup mieux les calories que ne le permettaient les points de contact successifs entre les pierres d'un mur.

2. Le mur capteur contemporain

Un mur capteur est un mur qui capte l'irradiation solaire et la transmet par conduction. Le principe du « mur capteur » est purement structurel : il fonctionne sans apport d'énergie fossile, sans pièce mécanique, sans entretien... aussi longtemps que le bâtiment reste debout.

On peut améliorer l'efficacité de captage d'un tel mur en utilisant l'effet de serre : il suffira de placer un double vitrage à faible émissivité à quelques centimètres devant le mur (on n'oubliera pas de prévoir un drain pour évacuer l'éventuelle humidité de la lame d'air située entre le vitrage et le mur). Ce vitrage a l'avantage de protéger le mur capteur de l'air froid d'hiver.

La face extérieure du mur capteur sera à l'ombre en été (pour capter les frigories) et au soleil en hiver pour capter les calories »). Pour assurer cette fonction, les végétaux sont plus efficaces que les ombrages structurels car mieux adaptés aux éventuelles variations du climat d'une année à l'autre. Les troncs et branches maîtresses des arbres caducs peuvent apporter une ombre relativement importante, en hiver, s'ils sont de fort diamètre : on préfère généralement les essences qui apportent une ombre dense tout en autorisant une taille fréquente et courte. Stricto sensu, ce sont les lianes qui présentent le meilleur rapport « ombre d'été/ ombre d'hiver ». De ce point de vue, la vigne vierge s'avère la plus efficiente mais les tonnelles de vigne, les glycines et les rosiers grimpants offrent aussi une excellente efficacité.

On lit généralement qu'un mur capteur doit être orienté au sud. De fait, son efficacité thermique s'avère maximale lorsqu'il est orienté à sud + 10° (zones humides) ou sud + 5° (zones sèches). Mais

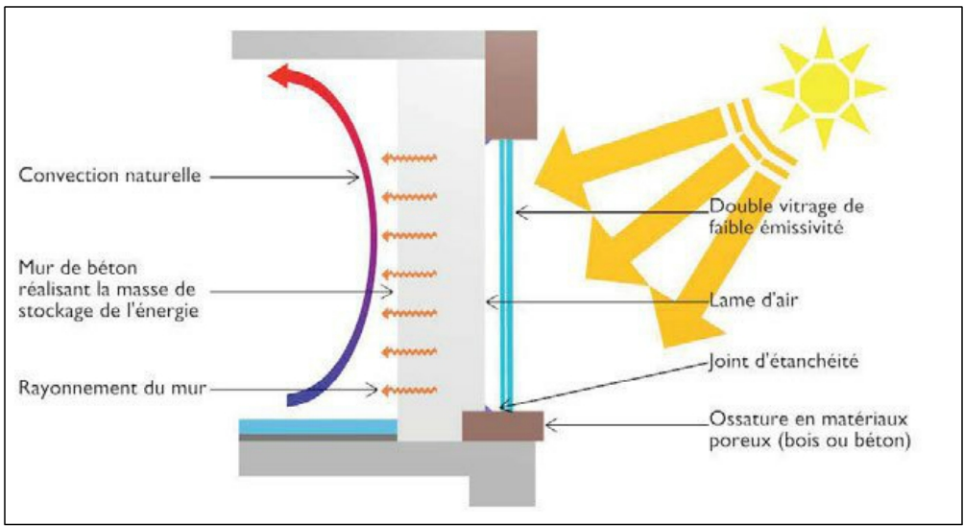


Schéma de principe d'un mur capteur. Le matériau choisi pour stocker l'énergie (avant de la restituer) devra avoir une densité élevée (2 t/m^3 au moins) et une faible diffusivité..

Copyright © 2016 Eyrolles.

c'est surtout la teinte du mur (derrière le verre) qui conditionne sa capacité à capter des thermies : les noirs offrent les meilleurs résultats, suivis des marron sombres.

Les anciens architectes chinois prétendaient que la teinte du rouge «sang de bœuf » utilisée à la Cité interdite était celle qui captait le maximum d'irradiation durant l'hiver.

Le mur capteur sera idéalement prolongé jusqu'à l'intérieur du bâtiment par un mur de refend lourd (cf. masse thermique), lequel servira de diffuseur d'énergie à l'intérieur du logement.

Le principe du mur capteur utilise le phénomène du pont thermique. Son bilan n'est positif que dans les régions où les hivers sont doux et caractérisés par des cieux clairs (forte irradiation). Un mur capteur n'est efficace qu'abrité du vent, sans quoi, en hiver, le refroidissement du mur par la convection de l'air pourrait apporter plus de fraîcheur que de chaleur à l'intérieur du bâti.

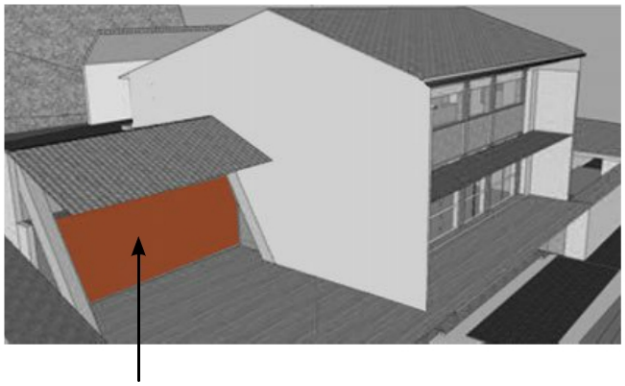
La face nord du mur capteur sera isolée. Puisque l'on se trouve en extérieur, des isolants à faible émission de COV (Composés organiques volatils) seront peu nocifs pour les habitants. Les polystyrènes (expansés ou extrudés), par exemple, offrent un rapport efficacité/coût particulièrement intéressant sur la durée : ils supportent parfaitement toutes les variations d'humidité, sans changer de volume.

Le déphasage (le temps que la chaleur du bout du mur met à arriver jusqu'à l'intérieur du bâtiment) peut être corrigé en incorporant du « fer à béton » dans la construction, ce qui par ailleurs le consolidera (cf. « Réglementation antisismique »).

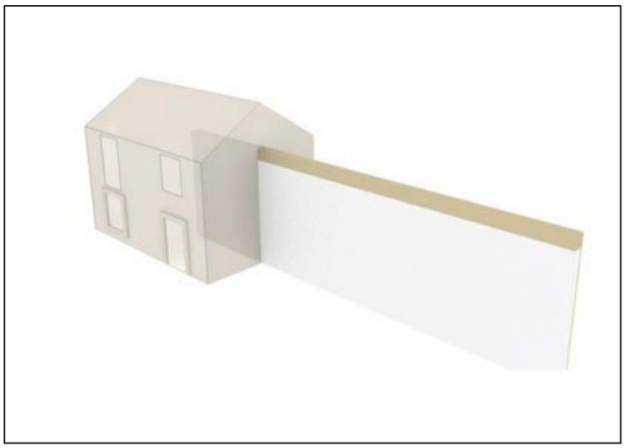
Attention : Si les barres d'acier aboutissent dans une fondation enterrée, il y aura diffusion d'énergie par celle-ci (d'autant plus que les diamètres des « fers à béton » seront importants), donc une part de l'énergie captée partira dans le sol.

Efficacité d'un mur capteur

Un mur capteur de 10 m^2, à Marignane, suffit à chauffer une maison de 100 m^2. Il est conçu comme le décrit le schéma de principe du mur capteur par l'Ademe, avec une paroi vitrée devant une lame d'air devant un mur lourd et est orienté plein sud.



Sous son auvent, ce mur capteur reste à l'ombre en été et est rafraîchi par une fontaine. En hiver, il reçoit le soleil tout le jour (la fontaine est coupée). Il tempère l'ambiance de la cage d'escalier voisine.



Le béton dispose d'une forte capacité à emmagasiner rapidement les calories du milieu ambiant. Mais le béton transmet bien les calories, c'est l'un de ses défauts. Pour un mur capteur, c'est un avantage. L'adobe, le mortier et la pierre sont d'autres matériaux à forte effusivité.

Copyright © 2016 Eyrolles.

SOLUTION BIOCLIMATIQUE 2. RAMPE CAPTRICE

1. L'histoire de la rampe captrice

Avant 1800, l'énergie était encore stockable : sous la forme de tas de bois ou de charbon. Son transport s'avérait particulièrement peu efficace (charrois), mais il y avait peu de pertes thermiques dans le processus de production « extraction-consommation finale ».

En 1800, Fourier établit les équations de la conduction de la chaleur, Napoléon vient d'être nommé Premier consul et un milliard d'hommes peuplent la Terre.

Après 1800, les innovations se sont multipliées à un rythme sans cesse plus effréné. Les modes de vie ont changé (on n'accepte plus de se vêtir et d'enfiler un bonnet de laine avant de se coucher).

Deux cents ans plus tard, en 2000, la population mondiale a été multipliée par sept, mais la consommation d'énergies fossiles l'a été par trente-deux. Comme autant de veilleuses, les torchères des champs pétroliers nous rappellent que l'extraction des énergies fossiles est source de gâchis (au mieux : 5 %). Vient ensuite une transformation énergivore (liquéfaction, raffinage...). La transformation en énergie électrique passe par l'émission de chaleur, elle s'avère peu efficace du point de vue énergétique (25 %). Le transport de l'électricité jusqu'aux domiciles alourdit encore le passif de ce bilan. Vient ensuite la transformation en énergie utile à travers les machines de nos foyers. Bref, selon les experts, dans le meilleur des cas, à peine 32 à 53 % de l'énergie primaire devient énergie finale. Ce ratio ne traduit pas une grande efficacité. À une époque où les énergies fossiles restaient accessibles facilement, cela ne posait guère problème.

Confrontés à l'absence d'énergie fossile dans l'espace, les scientifiques de la Nasa inventèrent les panneaux photovoltaïques pour animer leurs satellites. La solution technologique se révéla brillante. L'usage s'en est démocratisé et la production industrialisée. Les toits de nos bâtiments en affichent de plus en plus. L'énergie qu'ils captent offre l'avantage de ne pas risquer de manquer de ressources (les rayons solaires). Pour l'heure, l'efficacité de la transformation de l'énergie de l'irradiation en énergie électrique ne dépasse 15 % qu'en laboratoire. Le Sud de la France recevant 1 700 kWh/m²/an d'énergie solaire, le potentiel de production reste important. Si le coût de cette énergie s'avère encore supérieur à celui des énergies fossiles, cette situation pourrait s'inverser avant 2020, au vu des résultats obtenus par des laboratoires innovants. Mais l'énergie électrique n'est toujours pas stockable à grande échelle...

En Provence, la pierre constituait l'élément constructif primordial jusqu'à la Première Guerre mondiale. On l'assemblait au mortier de chaux : une pâte battue et rebattue pour en évacuer le plus d'air possible. L'ensemble formait une masse qui devenait de plus en plus homogène à mesure que la chaux séchait autour des pierres. Elle transportait l'énergie par conduction. Les bâtiments étaient chauffés au feu, mais surtout au soleil.

La pierre n'est pas un isolant, elle conduit l'énergie vingt à quatre-vingt-dix fois plus vite qu'un isolant standard : son coefficient de conductivité thermique (λ) est compris entre 0,7 (marnes) et 3,5 (pierre dure non poreuse). Supposons que l'on la chauffe en un point : l'agitation des molécules du minéral provoque un phénomène de transfert thermique (phonons). Les calories migrent, de grain en grain, toutes dans le même sens : elles se déplacent du chaud vers le froid. La chaleur se

Copyright © 2016 Eyrolles.

comporte comme un fluide se déplaçant à l'intérieur d'un solide, elle obéit à la loi de Newton et s'exprime en N/m².

Lorsqu'on pose une pierre chauffée sur une autre, chaque point de contact entre les deux représente un pont thermique. Les calories y passent. Le flux de chaleur emprunte ces voies. Si tout au long d'un muret chaque pierre est en contact par deux points avec la suivante, il se transmet une quantité d'énergie dans un temps donné. Si une pose n'a permis qu'un seul point de contact entre deux pierres, celles-ci se transmettront moins d'énergie dans le même temps. Comme un tuyau qui transporte de l'eau : le flux de sortie sera proportionnel à la surface de la section où le tuyau est le plus étroit.

Selon la diffusivité thermique du matériau qui constitue une pierre, il se passe un délai entre le moment où l'on chauffe un côté de la pierre et celui où l'onde de chaleur arrive de l'autre côté de la pierre. Ce délai s'appelle « le déphasage ».

On comprend bien l'intérêt qu'il y a à déphaser les températures de douze heures pour profiter le jour de la fraîcheur de la nuit (ou inversement). On pense moins souvent que l'on pourrait aussi tenter de profiter de la chaleur de l'été en hiver. Cela correspondrait à un déphasage beaucoup plus important : six mois.

Lorsque les températures de la Terre se refroidirent brutalement, il y a quatre mille ans, les Phéniciens furent contraints de trouver une solution pour apporter le surcroît de chaleur nécessaire. Les temples et leurs hauts plafonds demandaient beaucoup d'énergie additionnelle : ils les construisirent sur des plates-formes.

Le bâtiment cultuel se trouvait au-dessus d'une assise constituée d'un appareil de pierres et de terre. Sauf au sud, où il était précédé de sept mètres de pierres empilées dont chacune présentait huit points de contact avec ses voisines. À l'avant s'élevait un escalier raide, il affichait une pente de 30°.

Diffusivité

La diffusivité thermique caractérise chaque matériau. Elle mesure la capacité d'un matériau à transmettre un signal de température à travers 1 m d'épaisseur ($\Delta = \lambda/\rho c$, exprimé en m^2/s, où λ et ρc sont des caractéristiques propres à chaque matériau). La diffusivité thermique de la terre est très inférieure à celle de la pierre.

À cette latitude, cet angle correspond à la pente selon laquelle on absorbe le maximum de photons. Le soleil chauffait la surface de l'escalier, pénétrait dans le matériau, était transmis par conduction de pierre en pierre, jusqu'à alimenter de sa chaleur l'énorme volant thermique constitué par la terre tassée sur laquelle se trouvait le temple. Mieux : le temps qu'il fallait à l'onde de chaleur pour passer de la face de l'escalier à l'intérieur du temple (déphasage) représentait exactement six mois.

En d'autres termes : les calories apportées par les fortes irradiations d'été sur l'escalier arrivaient à la masse de terre située sous le temple six mois après.

On utilisait donc la chaleur de l'été en hiver. Les apports solaires de juillet chauffaient le temple par le sol en janvier. Dans une moindre mesure, la froidure de l'hiver atteignant le soubassement du temple quand l'air était chaud, l'air gelé de février rafraîchissait le bâtiment en août. Cet effet fut amplifié par les péristyles. Entre les piliers, ils laissaient l'irradiation d'hiver réchauffer la façade quand les rayons solaires d'hiver étaient bas. En été, par contre, la course solaire étant plus verticale, le soleil laissait ce mur perpétuellement à l'ombre, empêchant son échauffement.

Copyright © 2016 Eyrolles.

En jouant sur la longueur de la plate-forme sud, sur la surface de recouvrement des pierres du soubassement et grâce à une longue expérience, on arrivait à déphaser la chaleur d'exactement six mois. En d'autres termes : nos anciens n'avaient pas encore inventé les piles. Ils ne savaient pas stocker la chaleur. Les Phéniciens trouvèrent donc un système qui permettait de décaler le chauffage de la pierre par le soleil, pour que l'onde thermique générée lorsque le soleil était le plus chaud arrivât dans le temple lorsque l'hiver sévissait. L'apport d'énergie se faisait de plus en plus important à mesure que le froid se faisait intense (puisque l'automne suit le printemps de six mois).

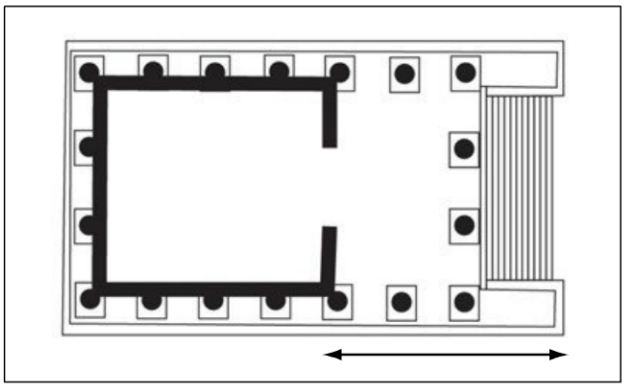
Lors du refroidissement des températures du monde de 2 000 av. J.-C., et durant 500 ans, les Phéniciens élevèrent tous leurs temples, orientèrent tous leurs escaliers au sud, tous selon le même angle, et ne construisirent aucune cheminée.

Un escalier de 60 m², orienté Sud et incliné de 30°, pouvait capter 5 mégawatts/an. Ils n'eurent pas besoin de consommer plus de bois pour se réchauffer. Ils n'eurent pas non plus d'énergie à dépenser pour glaner le précieux combustible.

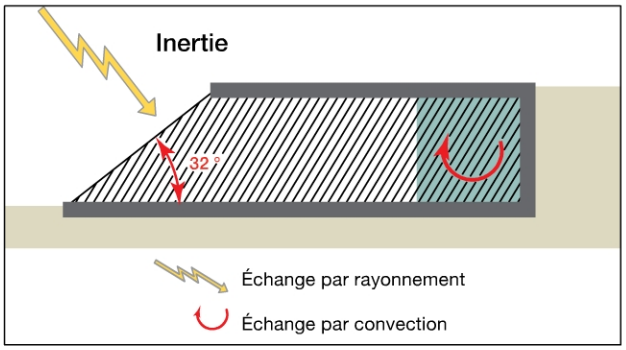
Ce modèle de comportement éco-responsable, cette frugalité dans la consommation des énergies seraient exemplaires aujourd'hui. La tentation s'arrête vite devant le mur des réalités : le coût de la main d'œuvre. L'économie de chauffage n'amortirait jamais l'investissement d'une plate-forme de 150 m³ de pierres empilées. Pourtant, nos modes constructifs actuels nous apportent une solution. Nous disposons d'autres matériaux minéraux remarquables. Parmi ceux-ci, notre civilisation a mis au point le béton de ciment. On le livre par toupies, on le coule en place sans effort. Il s'avère relativement bon marché et nécessite une manutention peu qualifiée. On le produit localement. Secs, les différents bétons font des solides suffisamment homogènes pour que nos logiciels thermiques les caractérisent.

1 tonne d'eau tempère environ 3 000 m³ d'air

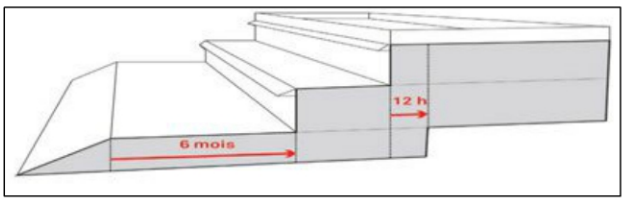
Pour élever de 1 °C la température d'une masse d'eau, il faut dépenser quatre fois plus d'énergie que pour élever de 1 °C la température de la même masse d'air, et vice versa. Pourquoi ? Du fait des liaisons hydrogène de l'eau (polarité). Noter que 1 tonne d'eau = 1 m³ et 1 tonne d'air = 773 m³.



Plan d'un temple phénicien avec un déphasage de 6 mois entre l'escalier et l'intérieur du temple.



Coupe de la rampe du temple de Jupiter avec un déphasage de 6 mois de la dalle entre le plan de captage de l'irridiation solaire (escalier à 32 °) et l'intérieur du temple..



La rampe assurant un déphasage de six mois, elle communique la chaleur de l'irradiation d'été à son autre extrémité en hiver.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Une maison provençale perchée et devancée par une terrasse, peut donc utiliser le soleil d'été pour se chauffer l'hiver. Il suffit qu'elle soit précédée, à une distance précise, d'une pente à 32 °. L'efficience du système dépendra de la résistance de surface du matériau du capteur. Un anthracite, une ardoise ou un graphite obtiendront des résultats majuscules. Une pente couverte de dalles de terre cuite brunies serait à peine moins efficace. Une simple peinture noire offre un excellent rendement.

Déphasage et amortissement d'une onde de chaleur

Aujourd'hui, on pourrait utiliser le principe de conduction dans le béton sans aucun problème. Les verres à double vitrage permettent d'augmenter le réchauffement de la face inclinée (en y ajoutant l'effet de serre). Ils protègent fort bien la face inclinée des courants d'air qui pourraient en enlever des thermies. Des isolants à cellules fermées (polystyrène extrudé) isolent ce type de rampe de la terre. Cette efficacité de nos matériaux modernes est telle qu'à des latitudes très au nord de l'Égypte ou de la Crète, on pourrait employer des rampes captrices. Ainsi, à 44° de latitude nord, on peut capter et transférer 5 MW grâce à 30 m² de plan incliné noir et leur assurer six mois de déphasage.

Dans l'épaisseur du béton, il se forme une onde thermique. Cette sinusoïde avance doucement. Au bout de trois années, elle est en place. Ensuite, elle se chauffe perpétuellement au soleil chaque été et transmet cette énergie calorifique à l'autre extrémité de la rampe exactement six mois plus tard.

Escalier à 32° des ruines du temple de Baalbek (Liban).

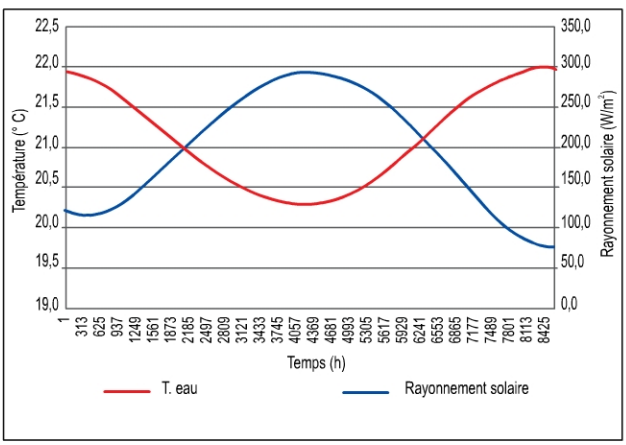
Copyright © 2016 Eyrolles.

La longueur précise de la rampe qui correspond à six mois de déphasage dépend des caractéristiques physiques du mélange de béton employé et des relevés de la base météo locale. Dans la pratique, il suffit qu'un béton très quelconque soit coulé dans un sarcophage d'isolants, que l'une des faces soit orientée au sud, inclinée à 32° et peinte en noir et que cette dernière soit recouverte d'un verre double vitrage pour obtenir, à l'autre extrémité, un chauffage solaire perpétuel !

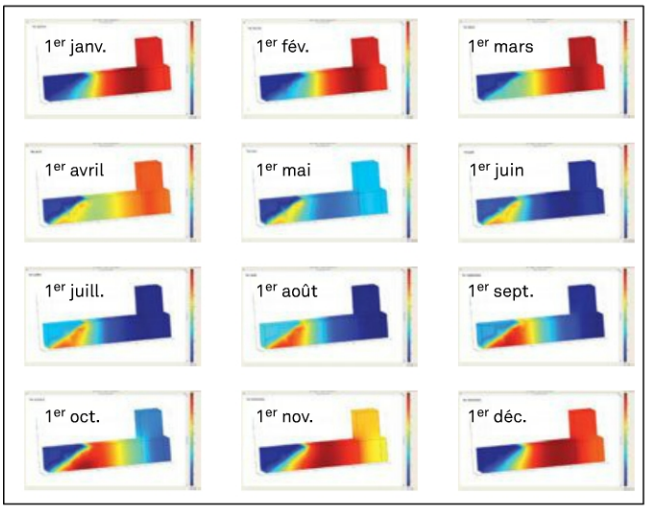
2. La cure du béton

L'eau et le ciment interréagissent. Cette hydratation produit des réactions chimiques. Celles-ci créent des gels, qui enrobent et emplissent les espaces entre les grains de sable et les graviers. Le béton durcit ensuite en une masse rigide.

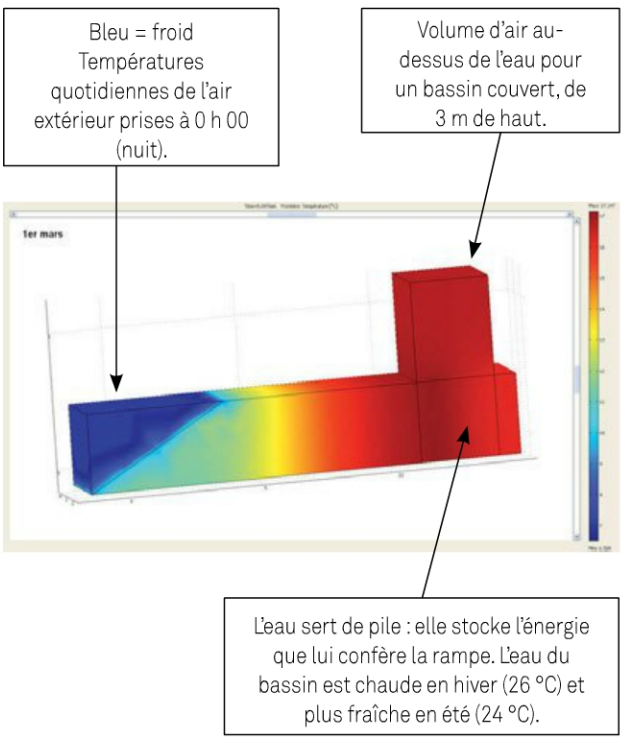
Ses qualités dépendent essentiellement de deux facteurs : les proportions du mélange eau/ciment et la cure. Si on incorpore trop d'eau dans le mélange, les espaces entre les particules seront plus grands. Le gel de ciment ne parviendra pas à les remplir. Il en résultera un béton plus faible, plus poreux et moins durable. Le fait d'ajouter ne serait-ce que 2 % d'eau supplémentaire au mélange fait perdre au béton jusqu'à 15 % de sa



Déphasage de 6 mois pour chauffer un stockage de chaleur (eau) destiné à rafraîchir une maison en été et à la réchauffer en hiver.

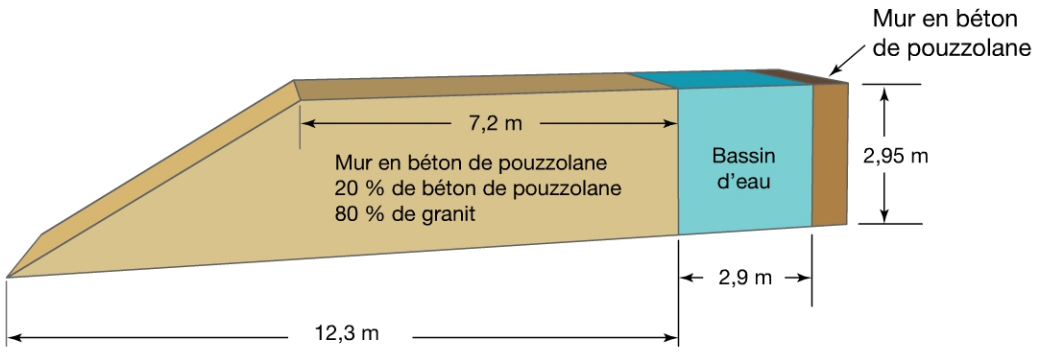


Évolution du stockage de chaleur sur l'année de janvier à décembre. Ainsi, une piscine couverte, à Nîmes, précédée par une large terrasse de béton pourrait être chauffée à 25 °C, même au plus froid de l'hiver. Ce qui suppose de construire une terrasse de 3 m d'épaisseur.



Stockage de chaleur : rampe captrice donnant, au nord, sur un bassin d'eau.

Copyright © 2016 Eyrolles.



Le principe de cette rampe est de prendre le soleil sur le plan incliné de 30° afin de réchauffer la masse ainsi que le bassin situé en son extrémité. Le but est de créer un amortissement et un déphasage de 6 mois avec le climat extérieur.
Les matériaux utilisés sont :
• pour la rampe d'inertie, un mélange de 20 % de pouzzolane et de 80 % de granit :
λ = 2,89 [W/(m.K)] ρ = 2 420 [kg/m^3] cp = 912 [J/(kg.K)]
• pour le bassin, de l'eau :
λ = 0,562 [W/(m.K)] ρ = 1 000 [kg/m^3] cp = 4 217 [J/(kg.K)]
• pour le mur en extrémité, du béton de pouzzolane :
λ = 0,44 [W/(m.K)] ρ = 1 300 [kg/m^3] cp = 880 [J/(kg.K)]

Cette simulation thermique présente une rampe de captage qui chauffe un bassin intérieur en hiver et le rafraîchit en été. Cette rampe de captage sert de terrasse. L'onde de chaleur due à l'irradiation reçue en été sur le plan incliné met 6 mois à traverser la longueur de la rampe et chauffe le bassin durant l'hiver suivant.

force. De ce fait, pour le lisser, il ne faut utiliser que des adjuvants. Ajouter de l'eau à sa surface modifierait la composition de la couche supérieure et la rendrait friable. Il s'ensuivrait un dégagement important de poudre de béton, matière volatile et agressive pour nos poumons.

Lorsqu'on passe devant un petit chantier, on ne peut que constater des pratiques contraires. Un ouvrier verse de l'eau dans une bétonnière avec un tuyau. La nécessaire précision du mélange ne semble pas l'effleurer. Un autre arrose consciencieusement une dalle avant de la lisser. Il n'a pas conscience du fait que les habitants de la maison vont respirer de la poussière de béton pendant des années.

La cure est tout aussi fondamentale pour les propriétés finales du mélange. Une fois le béton coulé, il faut veiller à ce que l'humidité des surfaces reste constante pour que la carbonatation ait lieu jusqu'au cœur. Ce ressuage rendra le béton de ciment moins poreux et plus durable. Soumis à sept jours de cure, il atteint 75 % de sa résistance. Il arrivera à 100 % au bout de six mois à l'humidité. Si on ne lui accorde que trois jours de cure, il ne dépassera pas 80 % de sa résistance nominale. Si on le laisse sécher sans lui conserver une hydratation de surface permanente, il n'atteindra pas 55 %.

Le mélange optimal contient 2 % d'air. L'addition d'un adjuvant « entraîneur d'air » va transformer de grosses bulles d'air en millions de minuscules vacuoles. C'est très important. Le béton devient un meilleur isolant, et surtout sa perméabilité diminue fortement. Il se trouve que les adjuvants

Copyright © 2016 Eyrolles.

coûtent beaucoup plus cher que l'eau et il s'avère que des entrepreneurs en font l'économie.

En passant devant le même petit chantier, on aura une pensée pour la durabilité du bâtiment. Le mélange du béton des poutres armées a été trop liquide (« pour que le ciment se coule bien partout », a dit l'ouvrier) et la cure n'a pas été conduite : le béton a été décoffré rapidement et laissé à sécher au climat de Provence (et à son mistral). Le futur propriétaire aura une maison fragile. Il ne le sait pas encore.

3. Le mortier de chaux

Nous considérons aujourd'hui les mortiers comme des mélanges. Ce n'était pas le cas autrefois. Les manœuvres pilaient la chaux avec le sable ou la terre. Ils se servaient pour cela d'une masse arrondie, pas d'une pelle. Cette action mécanique permettait de briser la terre en minuscules entités intimement liées à la chaux.

Lorsque la partie du mur considérée devait être particulièrement solide, on laissait reposer le mélange jusqu'à une semaine, à l'humidité, sous une toile couverte de sable (ou de terre). C'était le cas pour l'édification de murs militaires ou de fondations. On utilisait une chaux qui faisait sa prise au contact de l'air (CO_2) et non pas au contact de l'eau. On employait donc de la chaux aérienne. L'étude (récente) des murs des arènes de Béziers a montré que les vacuoles d'air contenues dans le mélange romain étaient très rares et de dimensions minuscules. À l'inverse, les mortiers de chaux mélangés à la « bétonnière » présentent de nombreuses grosses bulles d'air.

À noter

Dans une forteresse alsacienne, on a trouvé au cœur du mur d'enceinte de la chaux qui n'a toujours pas séché (450 ans après qu'elle a été posée !).

Le mortier de chaux aérienne réagit avec le CO_2 de l'air : c'est la carbonatation. Cette réaction chimique confère au mortier de chaux des caractéristiques physiques très proches de celles de la pierre, d'où sa très grande résistance. Le défaut du procédé réside dans la grande vigilance qu'il exige lors du séchage du mortier : il doit absolument sécher à l'humidité. Lorsque la chaux sèche, elle devient minérale. Quand la part extérieure du mur s'assèche, elle s'oppose à la carbonatation de la part qui se trouve vers le milieu du mur.

Il s'agit de maintenir la façade humide jusqu'à ce que le cœur du mur ait entamé sa carbonatation. Alors, seulement, le mortier de chaux deviendra aussi résistant au temps que la pierre.

Copyright © 2016 Eyrolles.

6| Tempérer le logement

On considérait comme confortable un logement dans lequel on pouvait porter les mêmes vêtements toute la journée. Dans l'intérieur des terres, au sud de la France, il fait toujours nettement plus froid la nuit que le jour : une énergie puissante et récurrente que l'on ne manqua pas d'utiliser. On construisit des murs dont l'épaisseur du matériau était précisément telle que l'intérieur des murs était frais pendant les heures torrides et chaud au plus froid de la nuit. On conçut des maisons lourdes qui permettaient de stocker cette énergie pour s'opposer aux extrêmes du climat extérieur. Quelques semaines de canicule ou de froidure n'affectent pas ces demeures.

SOLUTION BIOCLIMATIQUE 3. DÉPHASAGE

1. Comment isoler sa maison en BBC

Dans chaque vallée de chaque région, les bâtiments affichent des caractéristiques communes. La plus évidente concerne la forme du toit ; celle-ci dépend de la force des vents locaux, de la pluviométrie et de l'irradiation. L'épaisseur des murs est une autre constante.

Jusqu'à ce que Napoléon impose le mètre comme étalon de mesure, l'unité de longueur, en Provence, était celle du roseau : 1 canne = 2,20 m. Tout en dérivait. La plupart des devis mentionnaient des demi-cannes, des quarts de cannes... Pourtant, l'épaisseur des murs faisait exception à cette logique. Pourquoi ?

Les vieilles bâtisses de Provence présentent habituellement des murs constitués de « pierres massives » ou d'« agrégats de chaux entre deux couches de pierres empilées au mortier ». Dans le premier cas, les pierres taillées poreuses mesurent entre 50 cm et 58 cm (52 cm pour la plupart des pierres calcaires). En d'autres termes : selon la carrière locale, toutes les maisons étaient constituées de pierres de la même épaisseur. Pourquoi ? Cette épaisseur garantit un déphasage thermique de dix à douze heures. Les murs de 60 à 62 cm composés d'agrégats de chaux entre deux couches de pierres empilées au mortier affichent le même déphasage.

Pourquoi déphaser l'onde de chaleur de douze heures ? La chaleur captée par la façade met douze heures à traverser l'épaisseur de la paroi

Copyright © 2016 Eyrolles.

pour qu'il fasse frais dans la maison durant les jours d'été ET plus chaud les nuits. Les amplitudes thermiques quotidiennes sont importantes à Carpentras. Elles s'élèvent à 16 °C en été et à 14 °C en hiver.

Quand, vers deux heures du matin, l'air froid d'hiver commence à dévaler des reliefs, la maisonnée est heureuse de recevoir de la chaleur : celle qui a été captée à quatorze heures en plein soleil. Le mur sud se transforme en un immense radiateur. Sa face intérieure devient source d'émission de calories. Elle va les diffuser doucement et confortablement dans le logement.

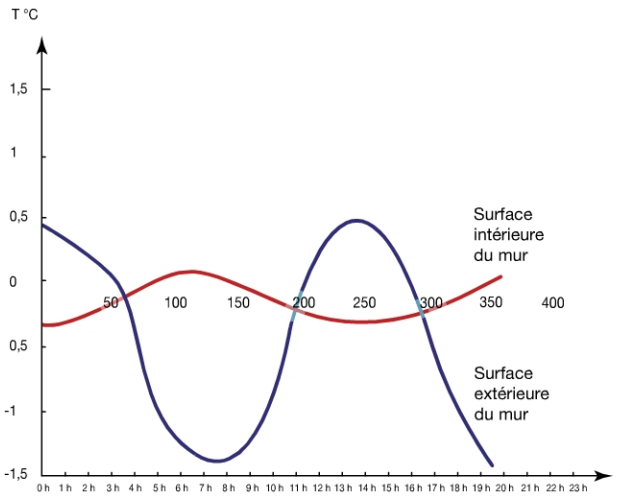
Si on déphase la chaleur des parois de douze heures, on crée des intérieurs dans lesquels les variations de température sont beaucoup plus faibles qu'à l'extérieur. La surface intérieure des murs reste fraîche tout l'été, au moment où il fait chaud à l'extérieur. Chaque souffle d'air qui pénètre dans la maisonnée tempère encore l'atmosphère. C'est ce qu'on appelait « le confort », cette faculté, apportée par la conception du bâti, de passer la journée entière habillé de la même manière. La masse thermique et le déphasage tempéraient tout. Si, dans les zones à forte amplitude, les parois assurent un déphasage de 12 h, les températures à l'intérieur du logement varieront peu. Il fait plus chaud à l'intérieur quand les températures sont au plus bas à l'extérieur, et inversement.

Les murs en pierre étant lourds, ils apportent une masse thermique importante tout en assurant un fort déphasage. Raison pour laquelle les vieux mas sont si agréables à vivre en été.

Si le déphasage doit être de 12 heures, de combien devrait-on isoler sa maison BBC ? Il n'y a qu'une seule réponse à cette question : choisir un isolant tel que l'épaisseur qui correspond aux normes d'un bâtiment basse consommation corresponde à l'épaisseur nécessaire à 12 heures de déphasage. En Provence, seuls les isolants à base de bois répondent à ces deux critères à la fois.

Concevoir une paroi performante n'est pas si simple. Il faut veiller à sa perméabilité à l'air, prévoir les déplacements d'humidité en son sein, s'assurer de sa durabilité ainsi que de celle de l'isolant…

Jamais les modes de vie des humains n'ont dégagé autant de vapeur d'eau qu'aujourd'hui : une salle de bains émet entre deux et trois litres de vapeur d'eau à l'heure. Or, de l'air humide véhicule beaucoup plus d'énergie que de l'air sec. Aussi l'humidité et le caractère isolant d'un matériau perméable sont très étroitement liés. Pour compliquer un peu les choses : chaque isolant réagit différemment à l'humidité. Des matériaux structurels, apparemment homogènes transmettent, aussi, plus ou moins d'énergie selon les conditions ambiantes.



Déphasage des parois sur une journée de 24 h entre les températures à l'extérieur et à l'intérieur du bâti.

Déphasage/masse/isolation

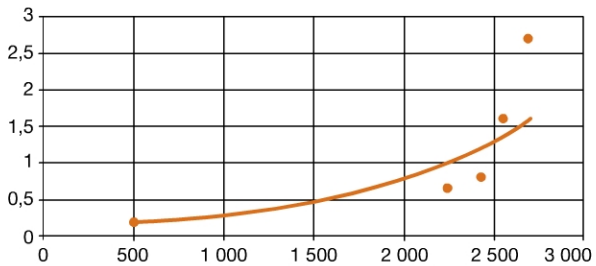
Le déphasage est utile pour le confort d'été et d'hiver. La masse thermique est indispensable au confort d'été. Une isolation importante est indispensable au confort d'hiver.

Copyright © 2016 Eyrolles.

2. Conductivité thermique de la pierre

Conductivité / densité

Plus une pierre est dense, plus sa structure confine au cristallin et plus ses électrons en tendance à vibrer à l'unisson : plus elle est conductrice. De même, plus la masse volumique d'une pierre est importante, plus vite elle conduit la chaleur (moins elle isole).



Rapport entre la masse volumique d'une pierre et sa conductivité thermique.

Vitesse de transmission / humidité de la paroi

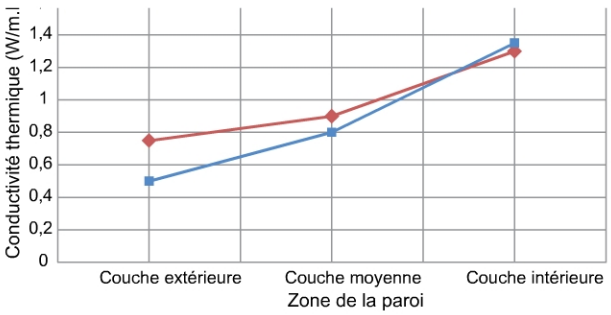
Un mur très humide verra un excès de température se propager très rapidement en son sein. À l'inverse, un mur sec isolera mieux (voir « génoises ») et freinera le transfert de calories. L'humidité au sein d'une paroi modifie donc le déphasage qu'elle exerce effectivement.

Vitesse de transmission / température ambiante

La conductivité thermique d'une roche augmente avec la température, si elle est sèche. Autrement dit, plus il fait chaud à l'extérieur plus une roche très dense laisse passer de chaleur. Ce n'est pas le cas d'une roche poreuse : elle évapore de l'humidité lorsqu'il fait chaud et donc refroidit la maison. En été, les murs de pierre tendre fonctionnent comme de grandes surfaces qui climatisent l'espace.

Vitesse de transmission dans la paroi

La chaleur arrive plus vite au sein d'une paroi en été (et fait monter plus vite la température de sa couche externe) que le froid ne la refroidit en hiver.



Conductivité thermique des différentes couches de la paroi.

Quantité d'énergie / type de pierre

Dans une pierre poreuse, le nombre et le diamètre des pores facilitant les transferts de vapeur d'eau participent particulièrement aux transferts thermiques. La vapeur d'eau, plus légère, transporte mieux les thermies que l'air sec (plus lourd, à volume équivalent). Mais, à l'intérieur de chaque pore d'une pierre poreuse, le transfert thermique s'effectue par convection entre la roche et un gaz (air ou vapeur d'eau) alors que, dans une pierre dense, la quasi-totalité des calories sont véhiculées par conduction (de molécule à molécule, à l'intérieur du solide). Or, la convection est un véhicule beaucoup moins efficace que la conduction. Aussi la conductivité thermique (λ) d'une pierre dense est de l'ordre de 3,5 et sa densité est élevée (2 600 kg/m^3 pour le granit ou le galet), tandis qu'une pierre poreuse est plus légère (2 200 kg m^3 pour une marne) et sa conductivité thermique avoisine les 0,7 (5 fois moins qu'une pierre dense !).

Copyright © 2016 Eyrolles.

Température dans le logement

La température ressentie par l'habitant d'un logement est la moyenne pondérée entre la température de l'air ambiant et la température radiative lui provenant des murs.
Si l'habitant se trouve à 20 cm de la paroi, s'il est vêtu et si l'air ambiant est immobile, alors la température qu'il ressentira sera l'exacte moyenne entre celle de la paroi et celle de l'air. La température irradiée vers l'intérieur par la face interne des parois dépend de la durée de leur déphasage des températures extérieures ainsi que de l'isolation totale assurée par la paroi, laquelle amortit l'onde thermique (diminue son amplitude).
La température de l'air ambiant dépend de la chaleur apportée à l'intérieur du bâtiment, soit à travers les parois, soit par un chauffage, soit par la ventilation, soit par des infiltrations d'air à travers les parois, soit par l'irradiation d'une masse thermique.

Quantité d'énergie / température ambiante

En hiver, la température nécessaire à l'évaporation dans la pierre n'est jamais atteinte, il n'y a pas de déplacement d'air à l'intérieur de ses pores, donc l'intégralité de la roche fonctionne comme un isolant. Or un matériau très microporeux s'avère peu conducteur, puisque, à l'intérieur de chacun de ses pores, la chaleur ne peut se transmettre que par convection. Parmi les roches poreuses, les argiles avec leurs pores sphériques régulent mieux l'humidité, alors que la conductivité des roches calcaires reste à peu près constante quelle que soit leur saturation en vapeur d'eau. En d'autres termes : en Provence, les argiles sont idéales pour réguler l'humidité des intérieurs alors que les calcaires conviennent mieux aux parois. Ces derniers amortissent mieux les excès de température que l'on trouve dans les zones à fortes amplitudes thermiques quotidiennes.

À noter

Lorsqu'un laboratoire annonce qu'une pierre a une porosité de 44 %, il s'agit d'une mesure moyenne. En réalité, l'intérieur du mur se situe plutôt aux alentours de 25 à 30 % et l'extérieur à environ 60 %. Ce qui explique que, malgré les grands transferts de vapeur d'eau assurés par les parois en pierre, celles-ci semblent toujours plus sèches à l'intérieur des logements qu'à l'extérieur, en hiver.

Quantité d'énergie / masse thermique de la paroi

Les mesures faites sur des bâtiments anciens ont montré que le déphasage de douze heures était accompagné d'un fort amortissement des températures dans l'épaisseur des murs traditionnels de pierre. En d'autres termes : non seulement les pics de température sont décalés de douze heures, mais l'amplitude de l'onde thermique est diminuée. Aussi, si l'amplitude thermique sur la face extérieure de la paroi atteint 16 °C, elle sera moindre sur la surface interne de cette paroi (de 5 à 8 °C pour une pierre calcaire, selon l'humidité ambiante).

Il suffit donc de prévoir des murs d'une épaisseur précise pour que, les jours d'été, les intérieurs des maisons de Provence soient rafraîchis de 5 à 8 °C et que les nuits en soient réchauffées d'autant. L'amortissement des températures confère aux logements une atmosphère douillette, confortable.

3. En Provence

Du fait de la rigidité des règles appliquées à la Provence, l'essentiel des constructions actuelles peut être divisé en deux groupes : celles dont la structure est en bois et celles où elle est à base de ciment ou de terre cuite. Malheureusement, la réglementation antisismique n'envisage guère d'autres solutions (chènevotte, pisé, bauge, le Tapi

Copyright © 2016 Eyrolles.

qui est un type de paroi provençale, constituée de terre coulée en bauge puis frappée au pisoir pour en augmenter la densité du torchis...). Les parois des maisons en bois peuvent aisément assurer un déphasage de douze heures. Elles seront agréables à vivre en hiver, mais risquent d'emmagasiner la chaleur en été si elles n'incluent pas de structure lourde (dalle de plancher, escalier...). Les maisons « en ciment » devront recourir aux isolants naturels pour l'isolation extérieure de leurs parois afin d'atteindre douze heures de déphasage tout en respectant la réglementation thermique, auquel cas elles seront agréables à vivre en été comme en hiver.

Dans les régions à faible amplitude thermique quotidienne (écart de température entre l'heure la plus chaude du jour et la plus fraîche de la nuit inférieurs à 8 °C), la « masse thermique » est l'option constructive qui apporte le plus de confort. C'est le cas au bord de la mer Méditerranée.

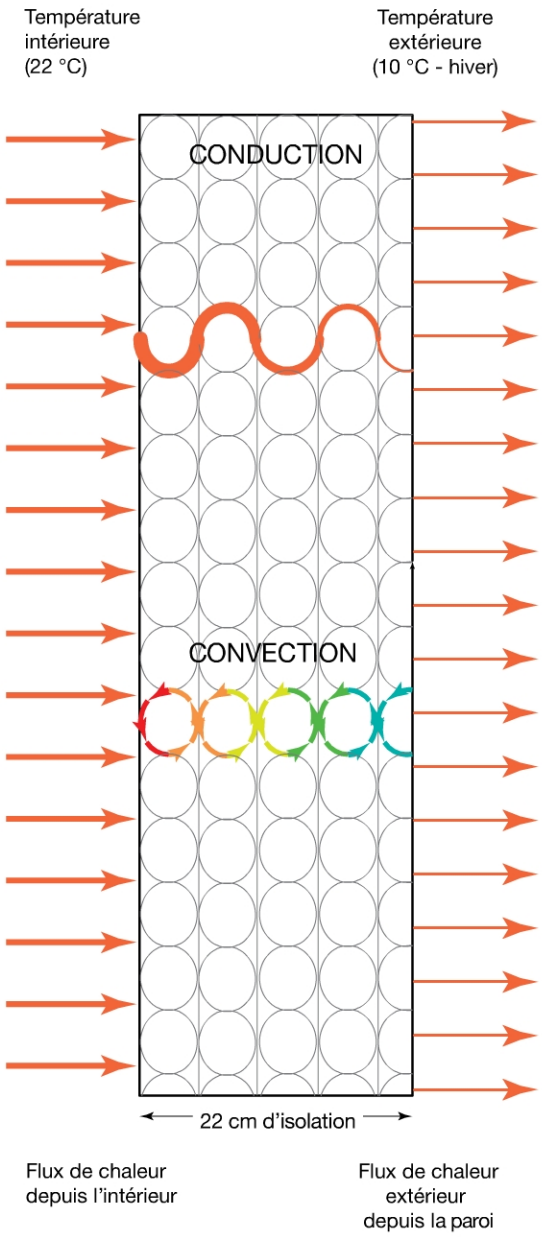
À noter

Dans les zones très humides (creux de vallée, proximité d'un cours d'eau) où la terre utilisée en construction est riche en argile, les parois des vieilles demeures présentent souvent des pierres très denses (galets), alignées en rangées continues. On les trouve, en particulier, dans la partie basse du mur à environ un mètre du sol. Il s'agit d'une barrière à l'humidité. La forte densité de ces pierres accumule plus de frigories que l'argile. Aussi, chaque nuit d'hiver, la vapeur d'eau contenue dans la paroi s'y condense en eau et, par gravité, redescend vers le pied du mur. L'eau, ne « montant » pas dans le mur, n'affecte ni la durabilité des parois ni la salubrité du logement.

Dans les régions à forte amplitude thermique quotidienne (amplitude supérieure à 13 °C), des parois assurant un déphasage thermique de douze heures représentent la meilleure option, celle qui apportera le plus de confort aux habitants du logement. C'est le cas dans tout l'arrière-pays de l'arc méditerranéen français, d'Uzès à Apt.

Maison de Jouques : ses larges murs en pierre, qui lui donnent beaucoup de masse thermique, sont une des caractéristiques du style provençal.

Copyright © 2016 Eyrolles.



L'isolation consiste en réalité à limiter fortement les déperditions, en cherchant à :

- réduire la conduction au minimum par la matière formant ces cavités isolantes, grâce à des matières dont la conductivité dite absolue est faible et dont la « peau » formant une cavité est d'une fine épaisseur ;
- optimiser les microconvections grâce à de très fines cavités idéalement sphériques contenant de l'air quasi immobile.

Par voie de conséquence, ces matériaux sont de faible densité (apparente) et présentent une faible inertie thermique.

Déperdition et isolation. La différence d'intensité entre le flux entrant et le flux sortant correspond à la montée en température des bulles d'air emprisonnées dans l'isolant. Plus cet air immobile est sec, plus l'amortissement de l'onde de chaleur sera importante.

Copyright © 2016 Eyrolles.

SOLUTION BIOCLIMATIQUE 4. MASSE THERMIQUE

La Durance partageait avec le mistral et le parlement d'Aix le titre de « fléau de Provence ». C'était une rivière puissante. À chaque fonte des neiges, elle se gonflait démesurément. Elle déboulait des Alpes comme un immense torrent de montagne. Son eau claire arrachait la végétation. Parfois, elle débordait. Alors ses flots pouvaient emporter jusqu'à des villages entiers. Ce fut le cas à la toute fin du xviie siècle : fluette à la fin de l'été, elle se révéla mortifère au printemps suivant. Elle récidiva en 1843 et en 1856.

La Durance reçoit l'eau de toutes les pentes du sud des Alpes françaises. Son bassin de captage est immense. De Manosque à Avignon, elle s'est creusé un lit qui dépasse parfois 500 m de large. Dès que fut inventée la technique adéquate, on s'empressa de contrôler ses flots. On construisit le barrage de Serre-Ponçon, on le termina en 1961. Son lac artificiel est le second d'Europe : 1,2 milliard de mètres cubes d'eau. Il fut rempli en deux ans seulement.

Le lac reçoit les flots de la Durance, il se remplit surtout au printemps (et à l'automne). Il fournit toute l'année l'eau potable de Marseille ou de Sisteron et irrigue plus de 100 000 hectares de culture. Évidemment, le débit de sortie de l'eau du barrage est très inférieur à celui de la Durance au printemps.

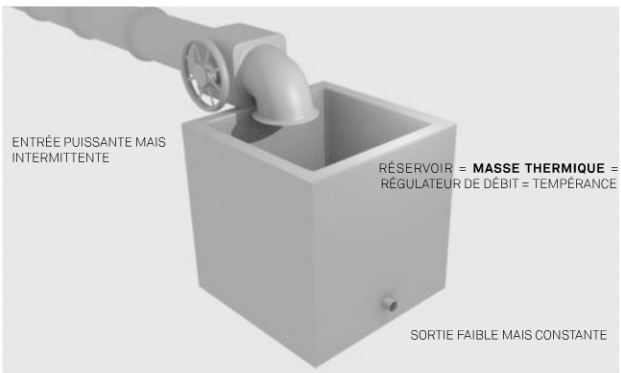
Une pierre poreuse affiche une faible diffusivité (l'échange thermique entre le mur et le climat intérieur se fait lentement) et une forte effusivité (le mur stocke beaucoup d'énergie thermique du climat extérieur). Ce que les Provençaux n'ont pas manqué d'exploiter.

1. Inertie thermique

Dans toutes les régions où les températures diurnes sont très supérieures à celles de la nuit, on utilise des matériaux à forte inertie (forte capacité thermique). Ceux-ci permettent d'employer le jour la fraîcheur emmagasinée la nuit. Ils tempèrent l'air du logement.

L'inertie due à la masse thermique ne dépend que du choix des matériaux. Les matériaux lourds qui se sont chargés de thermies les conservent tant que la température de la pièce dans laquelle ils se trouvent reste la même que la leur.

Dès que l'air ambiant se fait plus frais, dès qu'apparaît une différence de température entre l'air et la masse thermique, celle-ci commence à lâcher ses thermies jusqu'à ce que la température de la pièce et la sienne se trouvent de nouveau à l'équilibre. Or l'air est très léger.



Les masses thermiques fonctionnent comme ce barrage. Lorsqu'il fait chaud, les matériaux emmagasinent de la chaleur, puis ils la restituent. Les débits d'entrée diffèrent de ceux de sortie. Les métaux rendent leur énergie presque aussi vite qu'ils la captent. Pour reprendre l'image du barrage, on pourrait dire que le tuyau qui le vide a sensiblement le même diamètre que celui qui le remplit. Les autres matériaux denses sont plus inertes : le diamètre du tuyau de sortie est très inférieur à celui du tuyau qui les alimente.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Un mètre cube d'air (à 20 °C et à 1 Pa) ne pèse que 1,2 kg, tandis qu'un mètre cube de granit pèse 2 600 fois plus. En d'autres termes : toutes choses étant égales par ailleurs, dans un deux-pièces clos contenant 100 m^3 d'air à 20 °C, il suffirait d'un pavé de granit de 15 cm de côté à 22 °C pour que la température finisse par s'équilibrer à 21 °C.

Lorsque la masse thermique cumulée des matériaux du logement est importante, l'amortissement naturel permet d'atténuer les excès du climat pendant quelques semaines (canicules ou froidures). Comme si, quelles que fussent les températures extérieures, le bâtiment permettait, structurellement, de conserver une température stable et douce. Le climat de l'arrière-pays provençal est aussi caractérisé par de fortes amplitudes saisonnières. Les températures extrêmes de l'hiver y sont environ 40 °C plus froides que les canicules de l'été. Ces périodes de canicule ou de froidure s'avèrent relativement brèves. Leurs pics ne dépassent pas trois semaines (depuis 1709).

Pour ne pas souffrir de ces épisodes extrêmes, les Provençaux utilisèrent le plus de matériaux lourds possible dans leurs constructions. Leurs escaliers ou leurs balcons ne sont que pierres empilées : on ne voit jamais dans leurs édifices de volutes de bois ou de constructions légères. Pierre après pierre, ils ajoutaient des tonnes au bâti. Les maisons de l'arrière-pays provençal ont été construites lourdes.

La somme des masses des matériaux utilisés pour édifier une petite ferme dépasse allègrement la cinquantaine de tonnes. Les bâtiments traditionnels accumulent dans leur intérieur les matériaux denses : pierre, chaux et terre constituent leurs parois, cheminées et escaliers sont maçonnés, les carrelages couvrent le sol, les plafonds hauts sont chargés de plusieurs tonnes de plâtre, etc. Ce sont autant de réservoirs d'énergie. Rien n'interdit d'utiliser nos matériaux actuels dans le même esprit.

Capacité thermique des matériaux

La pierre, la terre, la brique, le ciment ou la terre cuite sont caractérisés par une masse thermique élevée : ils ont une bonne capacité à capter et à stocker la chaleur. Ils peuvent emmagasiner rapidement beaucoup d'énergie, cette caractéristique s'appelle la capacité thermique. Pour reprendre l'image du barrage, le tuyau qui remplit le barrage a un très gros diamètre, bien plus important que celui du tuyau de sortie.

Les matériaux à forte capacité thermique sont généralement caractérisés par une faible diffusivité thermique, c'est-à-dire que leur température va évoluer lentement en fonction de la température extérieure. Les matériaux denses ont une diffusivité plus faible que les légers.

On nomme effusivité thermique (Ef) la vitesse avec laquelle des matériaux échangent de l'énergie thermique avec l'extérieur. Encore appelée « chaleur subjective », elle mesure la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau se réchauffe. Plus l'Ef est faible, plus la surface du matériau se réchauffe vite. Le bois a une Ef beaucoup plus faible qu'un carrelage. Un revêtement en bois paraît chaud sous la main lorsqu'il est à 20 °C alors qu'un marbre, à la même température, donne une impression de froid au toucher.

L'inertie thermique du bâtiment permet donc d'écrêter les pics de température. Le Centre scientifique des techniques du bâtiment a déterminé que ce stockage permet de diminuer, en moyenne, de 5 °C les températures d'une pièce ! L'expérience montre que dans les vieilles maisons provençales, des pics de température (extérieure) de + 8 °C ne sont même pas ressentis. La conception architecturale s'attachera donc à placer les isolants à l'extérieur des matériaux lourds, de façon à ce que leur inertie n'échange pas de calories avec l'extérieur mais avec l'air du logement.

Les économistes auront bien noté qu'à l'exception du verre, les matériaux qui apportent la meilleure inertie thermique (béton, terre, pierre, mortier ou terre cuite) sont particulièrement économiques

Copyright © 2016 Eyrolles.

Murs, voûtes, escalier, terrasse... pierre après pierre, on construisait une masse pesante. Le bois servait de linteau ou de poutre, jamais de structure. Maison de santons..

par rapport à des équipements modernes (chauffage, climatisation, régulateurs, thermostats). À l'heure du changement climatique, si l'on construit des bâtiments qui dureront plus d'un siècle, il faudra rester vigilant à emprisonner une masse considérable à l'intérieur de l'enceinte des isolants. Béton de ciment, pierre, verre et adobe présentent une très forte masse thermique et une effusivité élevée, ils sont donc particulièrement recommandés pour créer de l'inertie thermique et assurer un confort ambiant au travers des saisons. Accumulés en masses suffisamment importantes à l'intérieur de l'enveloppe isolée, ils transmettront les semaines froides la chaleur captée durant les semaines plus chaudes. Cet effet d'amortissement des températures permettra de conserver une atmosphère douce même lorsque le climat extérieur connaîtra des épisodes particulièrement violents. Accessoirement, cette grande inertie thermique empêchera l'ambiance du foyer de se refroidir lorsqu'on ouvrira les fenêtres pour ventiler l'habitat : quelques instants après avoir refermé les ouvrants, on retrouvera exactement la température que l'on connaissait avant d'aérer.

Les bâtiments en forme de « cubes » qui résultent des préconisations du PassivHaus Institut ont deux niveaux. Ceux-ci sont séparés par une dalle de plancher intermédiaire et reliés par un escalier maçonné : deux fortes masses thermiques. Aussi, en constructions neuves, les architectes auront exclusivement recours à l'isolation par l'extérieur.

L'inertie thermique environnant le bâtiment : en bord de mer, l'inertie naturelle de la masse d'eau salée tempère le climat de la côte. À peine sous une terre végétalisée, l'inertie de la masse terrestre se fait sentir. À 20 cm sous terre, l'amplitude thermique diurne est déjà pratiquement annulée. À 50 cm sous terre (cas d'une toiture végétalisée), le déphasage est de 20 jours et, à Avignon, il fait 19 à 21 °C quand l'air extérieur affiche 27 °C. À 1,40 m sous terre, les effets de l'hiver ou de l'été sont fortement amortis : alors que les amplitudes extérieures ont dépassé les 30 °C, le thermomètre n'y varie que de 13 °C et le déphasage avoisine les trois mois. À 7 m sous terre, les températures sont constantes toute l'année (15,6 °C toute l'année à Marignane mais 15,4 °C à Rochefort-du-Gard).

Le saviez-vous ?

Dans le Sahara, la nuit tombe vite et les températures baissent rapidement d'une vingtaine de degrés. Pour passer une nuit confortable, les Touaregs aiment à se coucher sur une pierre plate, dans un creux de rocher, à l'intérieur d'une falaise, etc. : au sein d'une énorme masse thermique.

• Un peu de bon sens : supposons un chaudron vide que l'on chauffe à 200 °C (y compris l'air qu'il contient) et un même chaudron plein de pierres que l'on chauffe aussi à 200 °C (y compris les pierres qu'il contient). On place chacun des chaudrons dans deux volumes identiques ne contenant que de l'air à 20 °C. Lequel de ces deux volumes restera chaud le plus longtemps ? Celui qui contient le chaudron rempli de pierres : sa masse thermique est plus grande.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Les Romains, on l'a vu, utilisaient l'atrium. La nuit, tandis qu'ils dormaient dans leur chambre, cette grande pièce piégeait l'air nocturne. Ses matériaux à forte effusivité (marbre, granit…) captaient la fraîcheur qu'ils restituaient lentement pendant le jour. Les pieds de leurs lits étaient donc en bois. Ce matériau (semi-isolant) transmettait très peu de la fraîcheur du sol froid jusqu'à la couche. Mais le climat romain est relativement peu humide. Une forte inertie thermique dans une région plus humide implique de prévoir une ventilation importante, surtout si le bâtiment est occupé de façon intermittente. C'est le cas en Provence où, sauf mistral, l'humidité reste essentiellement comprise entre 65 et 85 %.

La masse thermique prend toute son importance pour un logement habité en permanence. Elle permet de considérablement diminuer les besoins en énergie de chauffage ou de climatisation. À l'inverse, pour les maisons de vacances peu occupées, inertie rime avec gaspillage. Si un touriste ne passe que quelques jours dans sa maison durant tout l'hiver, il devra préchauffer toute la masse thermique durant des semaines s'il souhaite y trouver une température ambiante agréable.

L'année la plus froide des cinq mille dernières années

En 1709, le froid tua beaucoup. Toute la France gela et tous les ports furent bloqués par les glaces. Venise n'était qu'une immense patinoire.
En Provence, tous les oliviers moururent du froid. Les jarres éclatèrent ainsi que toutes les réserves d'huile et de vin : un vent glacial venu de l'Arctique avait soufflé en continu, les températures étaient restées en-dessous de –20 °C durant 20 jours !
Toute l'huile ? Non : les citernes qui se trouvaient dans des bories, et elles seules, résistèrent au gel généralisé. L'énorme inertie thermique de ces huttes de pierre (250 tonnes en moyenne) protégea leur intérieur des caprices excessifs du climat.

2. Les caractéristiques thermiques des matériaux

La conductivité thermique (lambda λ)

Pour un matériau, la conductivité thermique mesure le flux de chaleur qui traverse sa paroi sur un mètre d'épaisseur pour un mètre carré de surface avec une différence de température d'un degré entre les deux faces de cette paroi. C'est une mesure effectuée en laboratoire d'essais.

Cette propriété traduit la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction. La chaleur se propage à l'intérieur du matériau de particule à particule.

C'est une donnée intrinsèque, spécifique à chaque matériau, qui caractérise donc uniquement ses performances isolantes. Plus le lambda est faible, plus le matériau est résistant au transfert par conduction.

Elle est exprimée en watts par mètre et par degré Celsius (W/m.°C) ou par kelvin (W/m.K).

La résistance thermique (R)

La résistance thermique (R) mesure le passage d'un flux de chaleur à travers l'épaisseur d'une couche de matériau. Elle est égale, pour chaque couche, à son épaisseur divisée par sa conductivité thermique.

Le R d'une paroi est égal à la somme des R de chacun des matériaux constituant une paroi, augmenté de ses deux résistances superficielles (intérieure et extérieure).

Copyright © 2016 Eyrolles.

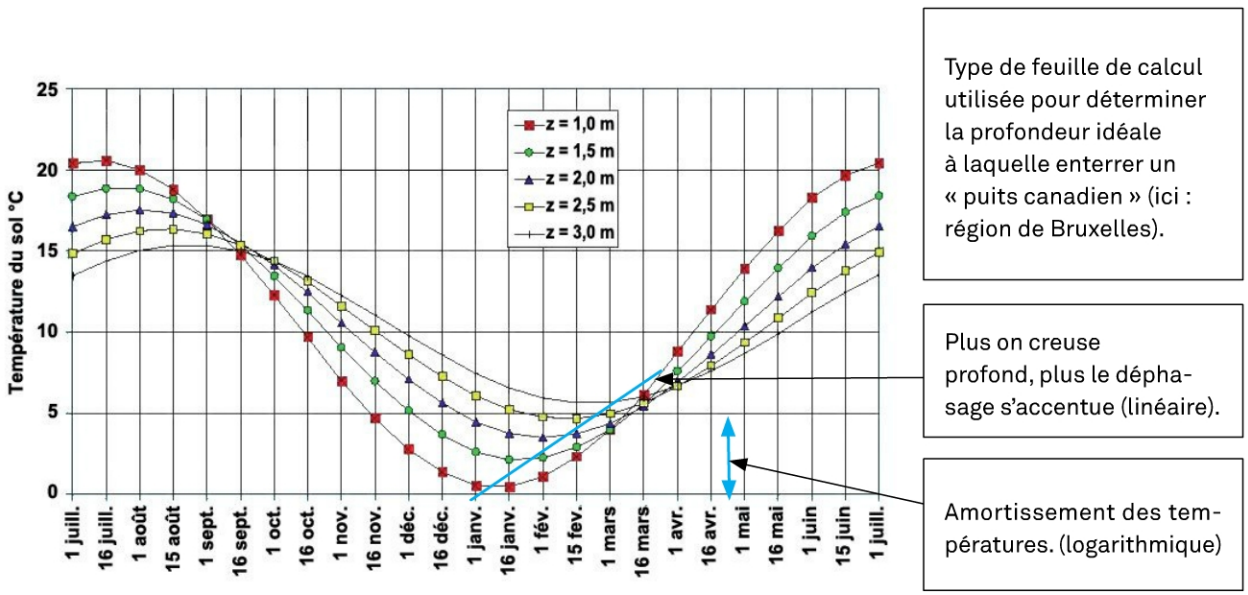
Plus le R est grand et plus le matériau est isolant. Il est donc exprimé en mètre carré degrés Celsius par watt (m².°C/W).

Le coefficient de transmission calorifique (U)

La réglementation européenne a défini le coefficient de transmission calorifique U : il caractérise les déperditions thermiques d'un matériau ou d'une paroi. C'est l'inverse de la somme des résistances thermiques (R) d'une paroi. Plus U est faible, plus la paroi est isolante. Il est exprimé en watts par mètre carré degrés Celsius (W/m².°C) ou, plus fréquemment, kelvins (W/m².K).

L'inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité d'un corps à stocker de la chaleur, et elle est caractérisée par la capacité thermique. L'inertie thermique d'un matériau solide va restituer la chaleur ou la fraîcheur qu'il a stockée en décalage avec les variations thermiques de l'air dans lequel il baigne. En s'opposant aux pics de température de l'air, l'inertie thermique permet d'amortir ces variations. Plus un bâtiment contient d'inertie thermique (à l'intérieur de son enveloppe isolante), moins la température en son sein connaîtra de variations et plus il sera agréable d'y vivre. En fait, dans un système initialement à l'équilibre, l'inertie thermique représente le temps de réponse d'un matériau soumis à une modification de la température extérieure : plus le temps mis pour que l'équilibre thermique soit à nouveau atteint est long, plus ce matériau est inerte. La vitesse à laquelle un matériau stocke de la chaleur est caractérisée par sa diffusivité (capacité physique de la structure du matériau à diffuser un signal de température en tout point de ce matériau). La diffusivité s'exprime en m^2/s.



Température saisonnière du sol à différentes profondeurs (2). Le point de convergence de la masse terrestre se situe aux alentours de 15 °C, en Provence. Cette température permet de rafraîchir. Elle est éloignée de la zone de confort que nous plébiscitons (> 19 °C) : on considèrera donc qu'une maison enterrée doit nécessairement être chauffée en hiver.

Copyright © 2016 Eyrolles.

50 tonnes de pierres empilées à épaisseur constante pour un espace à vivre d'à peine 5 m^2 : une borie représente beaucoup d'efforts pour peu d'habitabilité.

La vitesse de déstockage de la chaleur contenue dans un matériau est déterminée par son effusivité (capacité du matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement immédiat). L'effusivité s'exprime en J/K .m^2.s1/2.

Déphasage

Le déphasage définit le temps qu'il faut à un signal de chaleur pour traverser une paroi. Il dépend surtout de la capacité thermique de l'isolant.

Un déphasage de douze heures est essentiel au confort intérieur dans les régions où l'amplitude thermique quotidienne est élevée. L'isolation sera plus importante pour la sensation de confort dans les régions froides à faible amplitude ; la masse thermique sera plus importante pour la sensation de confort dans les régions chaudes à faible amplitude.

Un déphasage transsaisonnier de trois mois (ou de six mois) permet, en hiver, de conduire sur la face interne de la paroi la chaleur qu'avait perçue la face externe de cette paroi à l'automne précédent (ou à l'été précédent).

La chaleur spécifique d'un matériau (c)

La « chaleur spécifique » d'un matériau est aussi appelée « chaleur massique » ou encore « capacité thermique massique ». Elle définit la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1 kg du matériau. Plus sa valeur est élevée, plus le matériau peut absorber une grande quantité de chaleur. La chaleur spécifique de l'air, par exemple, est le double de celle de l'argon (1 005 J/kg.K contre 520 J/kg.K), ce qui explique pourquoi, lorsque des rayons solaires traversent un double vitrage, l'argon prélève moitié moins de chaleur que l'air.

La chaleur volumique d'un matériau (C)

La « chaleur volumique » d'un matériau est aussi appelée « capacité thermique volumique ». Elle définit la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1 m^3 du matériau. Elle est exprimée en J/m^3.K ou bien en Wh/m^3.K. (Pour mémoire : 1 joule = 1 watt.seconde, alors que 1 Wh = 1 watt.heure ; donc 1 Wh = 3 600 J).

Exemples : air = 1,256 kJ/m^3.K ; laine de verre = 99 kJ/m^3.K ; béton = 2 500 kJ/m^3.K ; et eau = 4 200 kJ/m^3.K). Il faut donc 10 000 m^3 d'air à 31 °C pour réchauffer, à 22 °C, 1 m^3 d'eau à 19 °C, ce que constatent les personnes qui n'ont pas bâché leur piscine pendant la nuit (et qui, en été, trouvent tous les matins que l'eau est bien fraîche).

Copyright © 2016 Eyrolles.

La chaleur latente spécifique d'un matériau (c)

La chaleur latente spécifique d'un matériau définit la quantité de chaleur nécessaire pour entraîner le changement de phase de 1 kg d'un matériau. Typiquement : la chaleur latente de vaporisation est la quantité d'énergie nécessaire pour transformer un kilogramme de liquide en vapeur. C'est une caractéristique assez peu fréquemment utilisée, mais qui a son importance en bioclimatique (évaporation de l'eau). Elle s'exprime en J/kg.

La résistance à la diffusion de vapeur d'eau

Le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (grandeur sans unité) compare la diffusion de la vapeur d'eau dans un produit et celle d'une lame d'air immobile de la même épaisseur. La résistance à la diffusion de vapeur d'eau (symbolisé par « Sd ») mesure combien une épaisseur donnée d'un matériau (ou d'un produit) s'oppose à la migration de la vapeur d'eau : Sd = μ x e. Plus le μ et le Sd d'un matériau sont grands, plus il s'oppose à la diffusion de vapeur d'eau. Parpaing en ciment : μ = 10. Un parpaing de 20 cm d'épaisseur s'opposera donc autant à la diffusion de vapeur d'eau qu'une lame d'air immobile de 2 m de large.

Copyright © 2016 Eyrolles.

7| Apport de fraîcheur

L'air immobile se stratifie, c'est-à-dire que les couches les plus chaudes se trouvent au-dessus des plus fraîches. Tous les peuples autour de la Méditerranée ont utilisé cette caractéristique physique des gaz. Il suffisait de capter l'air froid nocturne et d'en remplir un volume habitable dont le sol est composé de matériaux à forte inertie thermique. Les Provençaux trouvèrent une solution encore mieux adaptée à leur climat en utilisant l'adaptation aux saisons des frondaisons des végétaux qui poussent sous leurs latitudes.

SOLUTION BIOCLIMATIQUE 5. CAPTEUR D'AIR FRAIS

1. Les architectes romains

Vers 25 av. J.-C., Vitruve écrivit le plus grand traité d'architecture de l'époque romaine : *De architectura*. Ses dix tomes servirent de guide aux constructions de tout le Moyen Âge. Et il était considéré comme si essentiel qu'il fut l'un des tout premiers livres profanes à être imprimé (1486).

« Quatre doigts font une paume, quatre paumes font un pied et six paumes font une coudée. Quatre coudées font la hauteur d'un homme ou un double pas. Donc, vingt-quatre paumes font la hauteur d'un homme ! » D'artisan en apprenti, ces unités de mesure se sont diffusées dans toutes les colonies romaines, permettant une transmission plus précise des savoir-faire.

Les architectes romains avaient la réputation d'être sérieux : c'étaient des planificateurs et des géomètres. Ils comprenaient intimement les matériaux qu'ils préconisaient. Ils savaient, par exemple, évaluer la résistance aux intempéries ou à l'abrasion d'une pierre. Ils connaissaient une multitude de nuances d'argile. Ils choisissaient leur bois sur pied, savaient s'il devait être écorcé un an avant d'être coupé et déterminaient la durée de séchage des grumes avant de les débiter.

L'époque de Vitruve est très différente de la nôtre à plus d'un égard. Rome était opulente, les champs de céréales des colonies gauloises et ibériques produisaient abondamment, on pensait que l'Empire serait éternel. Le transport coûtait effroyablement cher, sauf par voie d'eau, et s'avérait particulièrement lent. Tout ce qui était lourd (terre, pierre, chaux, bois) était donc choisi au plus près du chantier. Les machines de construction se limitaient aux moyens de levage maritimes ou militaires. La qualité des « liants » connus interdisait toute élévation qui n'ait un appui vertical. Réduire

Copyright © 2016 Eyrolles.

la pierre en particules nécessitait des cohortes d'esclaves armés de marteaux ou de pilons. On creusait encore les mines au feu et à la pioche. On ne connaissait pas l'acier.

Les températures moyennes de la Terre étaient plus basses que maintenant. Celles de Naples correspondaient à peu près à celles de Nîmes aujourd'hui. Le bon sens des Romains n'était pas inférieur au nôtre.

Ils savaient qu'un investissement s'amortit sur la durée. Les bâtiments construits pour tenir quelques générations (maisons de la plèbe) étaient faits de matériaux moins sophistiqués que ceux qui avaient vocation à perdurer une éternité (aqueducs). S'ils édifiaient une construction pour des siècles et s'ils jugeaient le placement rentable, ils pouvaient tout à fait décider de faire venir des tonnes de pierres volcaniques concassées depuis Naples et les livrer dans l'arrière-pays provençal (pour fabriquer les joints des pierres du pont du Gard).

2. L'atrium

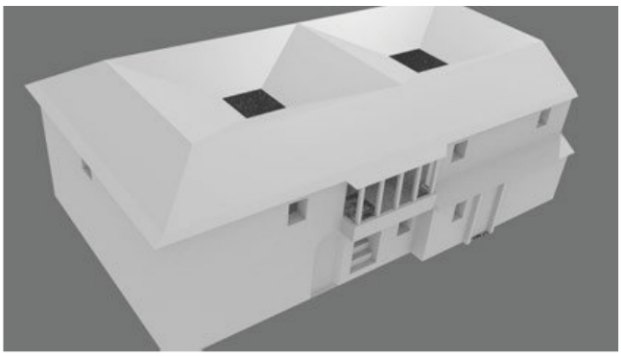
L'eau était la plus fondamentale des ressources nécessaires aux agglomérations. On édifiait les habitats à proximité de rivières de surface ou profondes, et les plus fortunés construisaient leur maison au-dessus d'un puits.

Les trois quarts de la géographie de l'Italie se présentent sous forme de montagnes et de collines, où les températures sont toujours plus basses côté Adriatique que côté Méditerranée. À l'époque de l'Empire romain, les amplitudes thermiques annuelles variaient peu, autour de 15 °C. Les hivers étaient donc très doux, mais les étés caniculaires. Les amplitudes thermiques quotidiennes de la région napolitaine avoisinaient les 6 °C en hiver. Du fait de la proximité des monts Apennins, elles dépassaient souvent les 13 °C en été. Le ciel portait peu de nuages : il pleuvait toujours moins de cent jours par an, en orages abondants. Quant aux vents, ils étaient doux, fréquents et venaient presque invariablement du sud (de SSE à SO).

Pour la saison estivale, les architectes romains devaient trouver une solution constructive qui gère à la fois l'excès de chaleur, la forte amplitude thermique et le captage d'une eau potable. Ils mirent au point une solution simple, économe et éternelle !

La méthode employée par les Grecs, à base de chicanes et de pièces éparses (« le dédale »), ne leur convenait pas : elle nécessitait trop d'espace et convenait à d'autres amplitudes thermiques quotidiennes qu'à celles de l'Italie. Les architectes romains avaient beaucoup emprunté aux Grecs, mais ce fut l'astuce utilisée par les Égyptiens qui leur parut la mieux adaptée à leur climat. Ils l'améliorèrent pour capter les pluies.

Chaque nuit d'été, vers quatre heures du matin, un air plus frais d'une douzaine de degrés que celui du jour baignait les maisons romaines (domus). Il s'écoulait le long des toits en pente, pénétrait dans le trou rectangulaire en leur centre et emplissait la cour qui se trouvait sous les tuiles. L'air du jour (plus chaud) qui s'y trouvait montait



Les quatre pentes du toit convergent sur un trou : le compluvium. Par lui, les eaux de pluie s'écoulent vers le bassin puis la citerne, de même l'air froid de la nuit s'écoule sur les pentes du toit et se trouve piégé à l'intérieur de la grande pièce sous ce toit : l'atrium.

Copyright © 2016 Eyrolles.

au-dessus de la nappe d'air froid jusqu'à s'échapper en se faufilant par les interstices laissés entre les tuiles. Alors, seul l'air frais occupait toute la cour. Il baignait les murs et les sols en marbre, leur apportant ses frigories. La plupart des ouvrants de la domus donnaient sur cette cour couverte (l'atrium). Ils ne comportaient ni vitrages ni joints : l'air frais pénétrait dans toutes les pièces et en refroidissait meubles, murs et sols.

Au petit jour, la structure de la maison était fraîche, baignée par l'air plus froid de la nuit. Le vent pouvait souffler, il ne pénétrait pas dans l'ouverture du toit située en contrebas des quatre faîtages qui la protégeaient. Les rares fenêtres donnant sur l'extérieur restaient fermées par leurs lourds volets de bois. Les deux portes successives menant à la rue formaient un sas. Bien que n'étant pas parfaitement étanche à l'air, cette conception en laissait échapper le moins possible.

L'air frais restait prisonnier. Les architectes romains avaient conçu un espace protégé à l'air artificiellement tempéré. Toutes les pièces de la maisonnée venaient y capter une température confortable. Celles-ci le restaient d'autant plus que l'atrium était couvert de pierres particulièrement denses, à grande effusivité (marbre). Il s'agissait de matériaux lourds, doués d'une forte inertie thermique. Ils relâchaient leurs frigories doucement, tout au long de la journée.

L'atrium était éclairé par l'ouverture centrale, au confluent des quatre pentes de son toit. Les sols de marbre poli réverbéraient la lumière dans toute la cour, sur les deux étages. C'était une grande pièce sombre, le centre de la vie de la domus.

Il y avait souvent une grille basse sur la porte donnant sur la rue. En été, elle était fermée par un volet de bois. Le sas entre les deux portes d'entrée était en légère pente. L'hiver, il suffisait d'ouvrir le volet bas et de laisser ouverte la porte donnant sur l'atrium : l'air froid s'écoulait dans la rue, d'autant plus que le jour s'échauffait. Ensuite, le volet fermé et la porte de l'atrium close, le sas protégeait de l'hiver. Heureusement, les froidures hivernales étaient douces dans la région. Ce n'était pas le cas dans l'arrière-pays provençal.

Les pluies y venaient aussi en orage, mais les étés s'avéraient encore plus caniculaires. Il n'y avait

Atrium d'une maison romaine. en hiver, l'air froid des nuits est évacué en ouvrant la porte qui donne sur la pente de l'entrée, laquelle débouche dans la rue.

Copyright © 2016 Eyrolles.

L'effet clairière

On appelle aujourd'hui « effet clairière » le type d'éclairage zénithal caractéristique de l'atrium. Il crée une forte luminosité sur un point (le compluvium) au milieu d'espaces plus sombres (à l'ombre des pentes du toit). Ce trait épais de lumière traverse l'obscurité, l'effet sera accentué s'il éclaire des matières mates.

pas de mer proche pour adoucir les températures. Dans les campagnes, le sas de l'atrium donnait sur une cour intérieure. Quelques platanes conservaient l'air frais entre les hauts murs. Au point le plus bas de la cour, une trappe laissée ouverte permettait d'en évacuer l'air froid durant l'hiver.

Le procédé de la trappe au point le plus bas de la cour, laissée ouverte en hiver mais conservée fermée durant les mois chauds, sera repris durant tout le Moyen Âge : il permettait de réguler l'effet rafraîchissant de l'air nocturne emprisonné entre les hautes murailles des châteaux forts.

3. L'atrium d'aujourd'hui

Ce qu'on appelle aujourd'hui « atrium » n'a que l'éclairage zénithal en commun avec le procédé de rafraîchissement mis au point par les Romains. Cela ressemblerait plutôt à un patio qui aurait été couvert par de grandes verrières qui surchauffent en été. Il faut des ventilations et des climatisations de forte puissance pour rendre son atmosphère agréable.

Le procédé de rafraîchissement nocturne, lui, demande d'emprisonner de l'air frais, nuit après nuit, et d'en baigner des matériaux lourds. On pourrait aisément utiliser le procédé de rafraîchissement des architectes romains.

Considérons un HLM d'aujourd'hui. Il est souvent couvert par un toit plat. Celui-ci est entouré de garde-corps destinés à assurer la protection des ouvriers qui pourraient y travailler. Vers le milieu se trouve une minuscule construction qui abrite la machinerie de l'ascenseur et s'ouvre par une porte en métal. Le principe des architectes romains consistait à piéger l'air froid de la nuit dans les zones qui connaissaient de fortes amplitudes thermiques quotidiennes. Il suffirait de remplacer le garde-corps par un muret (un acrotère) de protection de 1,20 m de haut : il délimiterait un volume sur le toit permettant de capter l'air frais. Si la porte était ouverte, l'air s'écoulerait par l'escalier qui y débouche, jusqu'au bas de l'immeuble. Si la porte en métal était remplacée par une grille interdisant l'accès au toit-terrasse, on obtiendrait le même effet, puisque l'air nocturne s'écoulerait à travers la grille.

Théoriquement, l'air froid, s'il emplit une cage d'escalier, devrait se stratifier, c'est-à-dire que l'on obtiendrait des couches superposées d'air à des températures de plus en plus chaudes à mesure que l'on monte dans les étages jusqu'au toit. On devrait donc avoir froid en bas de la cage d'escalier et chaud en haut. Or ce ne sont pas les résultats que l'on obtient. En effet, le béton est relativement transparent aux calories. Les tiges d'acier

L'air frais nocturne capté entre les murs de la cour rafraîchit les pièces à vivre de la demeure, en été. En hiver, on ouvre la trappe de la cour (finition plus claire, sur l'illustration) : l'air froid s'écoule en contrebas. © Mairie de Venasque

Copyright © 2016 Eyrolles.

qui arment l'escalier, les masses métalliques de l'ascenseur (et les câbles qui le guident), la cage d'ascenseur elle-même, la rampe... sont composées de matériaux très conducteurs. Les métaux transmettent très rapidement la chaleur, du chaud vers le froid, jusqu'à homogénéiser la température en leur sein. Ils évitent cette stratification.

Les structures métalliques se transmettent rapidement l'énergie jusqu'à se trouver en tout point à la même température. En transmettant les calories, elles rendent la température homogène de haut en bas de la cage d'escalier. Résultat : à Carpentras (amplitude thermique quotidienne d'été = 16 °C), on refroidit, de manière homogène, l'ensemble de la cage d'escalier d'un immeuble de dix étages de 10 °C chaque nuit d'été !

Qui plus est, tous les appartements de l'immeuble sont entourés de dalles de béton armé dont le ferraillage aboutit à ladite cage d'escalier. La froidure se transmet donc à l'intégralité de l'immeuble.

Pour peu qu'il respecte des normes BBC, il sera intégralement climatisé. Les fers à béton étant noyés dans le ciment, la masse thermique de ce dernier jouera à plein son effet de tempérance et relâchera doucement cette fraîcheur tout au long de la journée.

Enfin, la porte ouverte sur le toit-terrasse, pour peu qu'elle offre une surface de 2 m², assurera l'effet d'évacuation des fumées nécessaire (et obligatoire) en cas d'incendie. La seule contrainte consiste à construire un sas asservi en bas de l'escalier qui empêche de laisser ouvertes les deux portes en même temps. Il ne faudrait pas que l'air froid apporté toutes les nuits par le climat local s'échappe sans assurer son effet rafraîchissant... parce que quelqu'un aura oublié de fermer une porte.

Il suffit qu'une personne habilitée ouvre la porte sur le toit-terrasse tous les ans au début de l'été et repasse pour la fermer à la fin de l'automne. Si, une année, les saisons sont décalées (réchauffement climatique), il pourra s'y adapter sans difficulté.

L'investissement n'est pas considérable. Frais fixes : une grille et un sas ; frais variables : une demi-heure par an. Il va sans dire que cette climatisation naturelle ne consomme aucune énergie fossile et qu'elle se répétera année après année, indéfiniment et gratuitement. Alors... ils sont fous, ces Romains ?

4. Le rafraîchissement passif

Outre l'ombrage, plusieurs sources de rafraîchissement passif sont utilisées en bioclimatique. La plus efficace étant celle qui est la mieux adaptée aux données climatiques locales de chaque projet. On tire parti, le plus souvent, des quatre mêmes principes : évaporation de l'eau, évapotranspiration des végétaux, captage de l'air froid nocturne, température constante de la Terre. Celle-ci connaît une température constante à partir de 7 m de profondeur (entre 14 et 16 °C, selon les latitudes). Plus on creuse près de cette profondeur (cave, parking enterré), plus on se rapproche de ces températures. Un tube métallique isolé enfoncé à cette profondeur peut servir à conduire cette fraîcheur.

Captage d'air nocturne : c'est le procédé que les grandes civilisations antiques de la Méditerranée ont utilisé : Égyptiens, Crétois, Romains (atrium), Grecs (dédale), Arabes d'Al Andaluz (patio). On considère que plus l'air est frais, plus il se déplace comme un liquide. Il suffit de le guider, chaque nuit, vers un volume isolé des vents, et de conserver autant que possible cet air frais au contact de matériaux très lourds (marbre, terre crue, ciment, etc.). Ce procédé est d'autant plus efficace que l'amplitude thermique quotidienne est importante dans cette région. Il présente une difficulté : il faut prévoir un écoulement de cet air frais loin du logis pour les mois d'hiver.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Patio de captage d'air nocturne en Avignon : le sol n'est composé que de matériaux à forte masse thermique (sable et galets).

Évapotranspiration : les plantes transpirent dès 21,7 °C. Certaines ont une face supérieure cirée (qui ne transpire pas) et concentrent leur évapotranspiration sous les feuilles. Le record d'efficacité est, semble-t-il, atteint par certaines vignes vierges (à long pédoncule) qui peuvent rafraîchir une paroi au soleil de 14 °C !

Lorsque l'eau s'évapore, la réaction chimique (rupture des liaisons hydrogène) consomme beaucoup de chaleur ; cette chaleur est pompée de l'environnement immédiat. Deux grammes d'eau absorbent plus de 1 kcal de l'air ambiant lorsqu'ils passent de l'état liquide (eau) à l'état gazeux (vapeur d'eau). Plus cette évaporation a lieu à température basse (à l'ombre), plus la réaction absorbe de chaleur. On tire parti de ce phénomène en faisant passer un courant d'air sur du charbon mouillé (procédé égyptien), sur des contenants en terre cuite (procédé maghrébin), sur des plafonds en plâtre (procédé provençal), sur des galets lourds enfoncés dans un sable humide (procédé nasride).

On peut aussi mixer ces procédés. En cas de canicule et s'il y a un peu de vent, on arrose le toit plat d'une maison du Maghreb (dont la terrasse est entourée d'un muret continu) pour que cette eau s'évapore la nuit : on rafraîchit ainsi encore plus l'air nocturne capté avant qu'il ne tombe dans la pièce principale par l'ouverture d'accès au toit ; toutes les masses thermiques à l'intérieur de la pièce seront d'autant plus refroidies.

Il existe d'autres procédés moins fréquemment utilisés : fraîcheur latente (emploi de matériaux à changement de phase autres que l'eau), déphasage saisonnier de six mois (procédé phénicien), etc.

À proximité immédiate d'une très belle et très ancienne demeure de Saint-Rémy-de-Provence, les abords d'une piscine avaient été protégés du vent par quelques plantes et un mur périphérique de 2,50 m de haut. Deux portes donnaient sur cet espace. On décida de les laisser ouvertes toute la nuit. Il en résulta que la température de l'eau du bassin fut tout à coup supérieure de 5 °C à 8 h (et de 3 °C à 12 h).

Une maison de la banlieue de Draguignan donnait sur un jardin de ville, intégralement ceint de murs qui les séparaient des voisins. Au bout du jardin, une poterne en bois donnait sur trois marches et, en contrebas, « la rue de derrière ». En été, on laissait la poterne fermée : l'air froid de la nuit restait relativement captif entre ces hauts murs, protégé par les frondaisons des arbres et arbustes du jardin ; au petit matin, l'herbe était fraîche sous les pieds et mouillée de rosée. Les arbustes, « les pieds au frais et la tête au soleil », poussaient heureux et donnaient des récoltes de fruits abondantes. En hiver, on remplaçait la porte du fond du jardin par une grille, l'air froid s'écoulait par la rue en contrebas.

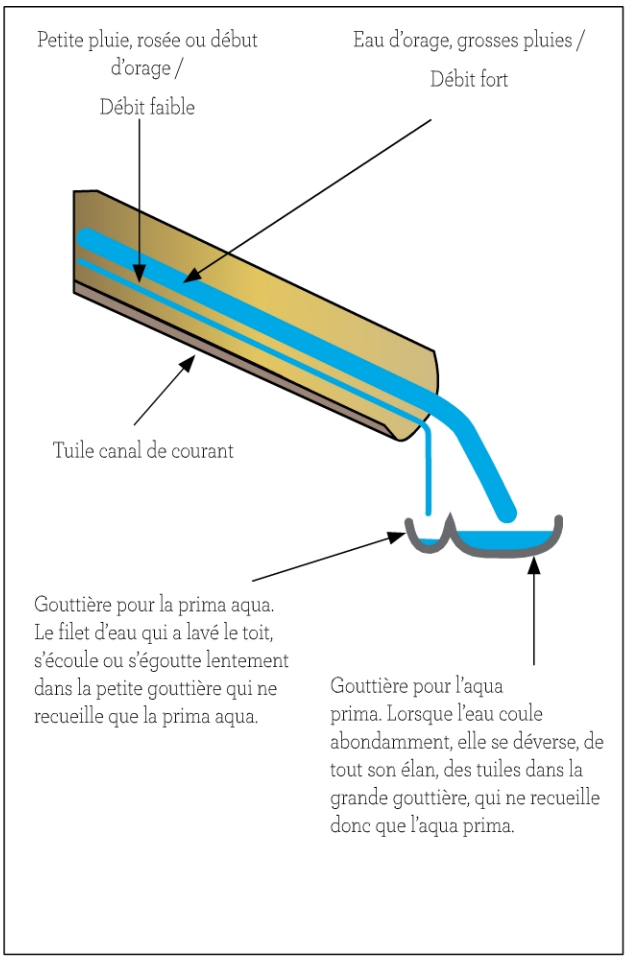
Copyright © 2016 Eyrolles.

Un entonnoir pourrait être décrit comme une grande surface de captage séparé d'une section de sortie beaucoup plus petite avec, entre les deux, un volume relativement grand, étant donné la section de sortie.

Imaginons un jardin haut de 200 m^2, au niveau du premier étage d'une maison. Si le jardin est entouré d'un muret continu, celui-ci définit la grande surface de captage (200m^2). Si le muret mesure 1,20 m de haut, il définit le volume relativement grand (240m^3). Supposons maintenant qu'une fenêtre du premier étage de la maison, de 1 m de large, reste ouverte et soit la seule ouverture donnant sur ce jardin haut ; supposons encore que cette ouverture soit à 0,80 m du sol. Alors, une hauteur de 0,40 m × 1 m de la fenêtre constituera la section de sortie (0,40 m^2). Dans cet exemple, la surface de captage est 500 fois plus grande que la section de sortie. Si seule la fenêtre de l'étage est restée ouverte et que tous les autres ouvrants de la maison sont restés fermés durant la nuit, on considérera qu'il n'y a pas de fuite d'air possible par les parois non plus que par le sol de la maison. L'air froid qui s'est

Prima aqua et aqua prima

Lorsqu'un orage arrivait, la pluie commençait par tomber doucement, lavant le toit des poussières qui s'y étaient accumulées. Un filet d'eau s'écoulait lentement des tuiles basses. Cette eau-là était considérée comme impure par les Romains. Elle était chargée de poussières (et de la moindre pollution) et ne s'utilisait que pour arroser les plantes ou laver les sols. Comme c'était l'eau qui s'écoulait la première du toit, on l'appelait « la première eau » (prima aqua).
Ensuite, l'orage prenait de la vigueur et déversait ses flots sur les tuiles. Ils coulaient jusqu'au trou rectangulaire situé au centre des quatre pentes du toit (le compluvium). Celui-ci était entouré d'une gouttière de terre cuite ou de cuivre d'où partaient de petits tuyaux. Comme des crachoirs, ils servaient à diriger l'eau exactement au centre du bassin de l'atrium, deux étages plus bas. Captée, l'eau passait par un tuyau sous le sol qui débouchait dans la citerne. Seule l'eau propre pouvait être dirigée vers la citerne, c'est-à-dire l'eau qui s'était précipitée après que les tuiles canal de courant avaient été lavées de toute poussière par « la première eau ».
Sous l'atrium, on stockait une eau claire et saine, celle qu'on appelait « l'eau de qualité » (aqua prima).
Nota : les tuiles canal de courant sont celles dans lesquelles s'écoule l'eau du toit. Juxtaposées, leurs unions sont protégées par les tuiles canal de couvert.



Système de séparation des eaux pluviales à l'égout d'un toit en tuiles canal : entre la prima aqua et la aqua prima, grâce à la différence de débit.

Copyright © 2016 Eyrolles.

déposé dans la surface de captage va suivre la loi de la gravité et remplir le bocal que constitue la maison ; l'air chaud qu'il y avait dans la maison va rester au-dessus de l'air froid jusqu'à ce que, le bocal rempli, il déborde et s'évacue par la partie de la fenêtre qui se situe au-dessus du plan défini par la hauteur du muret (1,20 m).

Donc, durant la nuit, les masses thermiques situées dans la maison vont se trouver baignées par un air à la température de l'air nocturne. Elles vont échanger avec cet air la chaleur qu'elles ont emmagasinée durant la journée et créer un air tiédi qui va remonter au-dessus de l'air le plus froid et... s'évacuer. Jusqu'à ce qu'à la fin de la nuit, les masses thermiques situées dans la maison se soient refroidies, c'est-à-dire l'intégralité des masses thermiques situées à l'intérieur de l'enveloppe qui isole les parois.

Pour s'assurer que l'air froid ne s'échappe pas de la surface du jardin, il faut envisager beaucoup de végétaux et une porte qui ferme bien (envisager un joint continu). Pour s'assurer que cet air froid ne s'échappe pas du jardin en été mais qu'il s'en échappe toujours en hiver, il faudrait envisager une porte qui n'ait que deux positions d'équilibre possibles : tout à fait fermée ou bien tout à fait ouverte. Pour ce faire, on décale légèrement (vers le côté de l'ouverture) les deux gonds du bas : celui qui est fixé au dormant de la porte (le gond femelle, la paumelle) et celui qui est fixé au châssis (le gond mâle, qui porte le goujon). Les deux gonds du bas étant légèrement excentrés par rapport aux deux gonds du haut, la porte ne peut rester entrouverte. Si on a ouvert la porte de moins de 90°, dès qu'on la relâche, elle vient se plaquer par son propre poids contre le chambranle. À l'inverse, en hiver, on laisse la porte grande ouverte (180°) : si un coup de vent la déplaçait, le propre poids de la porte aurait tendance à la ramener en position grande ouverte. Cela suppose que l'axe de rotation de chacune des deux paires de gonds se trouve sur la même ligne (et que cette ligne ne soit pas exactement verticale). Ce qui peut se faire avec les gonds d'une porte de jardin pourrait aussi se réaliser avec des charnières.

SOLUTION BIOCLIMATIQUE 6. VÉGÉTAUX

1. Albédo

On nomme albédo la propriété d'un matériau à refléter la lumière. Le terme vient du latin (*albedo* = blancheur). On mesure cet effet sur une échelle allant de 0 (le noir le plus profond) à 1 (le blanc le plus lumineux). Cette notion est fondamentale en climatologie. L'accumulation de toits sombres et de surfaces goudronnées crée d'immenses îlots de chaleur dans nos villes modernes (+ 3 à + 8 °C, en été). L'hypersédentarisation des humains et l'utilisation des goudrons ont un impact plus important sur le réchauffement de notre planète que leurs émissions de CO_2 ! Steven Chu, prix Nobel de physique et secrétaire général à l'Énergie du gouvernement Obama, a démontré que, si l'on peignait les toitures, trottoirs et parkings en blanc, on refroidirait plus la Terre en un an que les rejets de tous les véhicules du monde ne réchauffent la planète en onze ans.

L'aéroport de Thulé, au Groenland, est construit sur le permafrost (terre perpétuellement gelée). Du fait du réchauffement climatique, il menaçait de s'écrouler. On a peint la piste en blanc. L'albédo de l'asphalte est de 0,10 alors que l'albédo des

Copyright © 2016 Eyrolles.

peintures utilisées (piste et marquages) corrigé des traces de pneu et autres poussières, s'élève à 0,85. Le réfléchissement des rayons solaires a diminué le réchauffement de l'asphalte. Ces calories évitées ne sont plus transmises à la terre. L'albédo empêche maintenant le permafrost de dégeler. Cette solution s'avère infiniment moins coûteuse que les machineries et les immenses tuyauteries de liquide réfrigérant qui étaient envisagées. Une solution bioclimatique simple mais efficace a fait économiser une dizaine de millions de dollars aux contribuables.

On a proposé plusieurs solutions constructives pour arrêter le réchauffement climatique. Un Danois, Tobias Godvils, a proposé d'implanter 60 000 km² de miroirs dans les déserts pour arrêter le « réchauffement climatique ». Le projet envisagé coûterait 280 milliards de dollars US. Il y a des solutions tellement plus efficaces et moins coûteuses. L'une d'elles consisterait à peindre tous les toits en blanc et à n'utiliser que des asphaltes gris clair, dans les 34 pays de l'OCDE. Dix mètres carrés de miroirs sur un toit ont un impact supérieur sur le climat à une tonne de gaz à effet de serre (CO_2). Par leurs teintes sombres, les suies (des feux, cheminées et pots d'échappement) représentent un effet réchauffant pour la Terre équivalent à 2/3 de celui du gaz carbonique. Selon sa couleur de surface, un solide captera plus ou moins l'énergie du même rayonnement solaire et ce dans des proportions considérables.

Exemples d'albédo :

• Une neige fraîche réchauffe fortement un chalet par la réflexion de l'irradiation solaire en hiver. Elle réverbère des photons vers les parois du chalet et en chauffe les parois sombres. En hiver, on perçoit une très forte luminosité parce que la neige est fraîche et le soleil est bas (albédo de la neige fraîche = 0,95). La lumière est plus douce au printemps, lorsqu'on est entouré de « vieille neige » (albédo = 0,6).

• Le sol d'une rue étroite est plus souvent à l'ombre que celui d'une avenue, donc son albédo est plus faible. Si les toits des maisons qui bordent une ruelle avancent au-dessus d'elle, l'ombre projetée au sol sera encore plus importante. C'est ainsi que les Provençaux édifiaient leurs villages.

• Une feuille d'herbe fait de l'ombre à la suivante. La plante les étale jusqu'à profiter au maximum de l'irradiation solaire, ce faisant, elle apporte une ombre maximale au sol. L'albédo d'une surface herbeuse est faible (0,2 à 0,23), elle reflète peu de lumière alentour. Donc, un mur de maison situé au nord d'une allée de gravier blanc recevra beaucoup plus de chaleur réfléchie que s'il longe une surface engazonnée. En Arles, la température sous un platane, en été, est 6 °C plus fraîche si le sol à l'ombre est couvert d'herbe.

• Sous un toit couvert de cinquante centimètres de terre, la température en juillet en Avignon atteindra 24 °C. Si cette terre était couverte d'herbes, l'albédo ferait baisser cette température à 21 °C. Il faudrait ajouter à cet effet albédo deux autres éléments : l'arrosage et l'évapotranspiration. En hiver, les plantes ont de très faibles besoins en eau et le froid fait que l'évaporation en est très faible. Par contre, en été, à l'ombre des feuilles, les molécules d'eau situées dans la couche superficielle de la terre s'évaporent et refroidissent l'air au pied de la plantule de plus de 550 calories pour chaque gramme évaporé. En Provence, la rosée est abondante. Selon la localisation de l'endroit considéré, son évaporation peut refroidir chaque mètre carré du sol d'environ 150 000 calories tous les matins (Carpentras). Une autre particularité des plantes est qu'elles transpirent. À partir de 21,4 °C leurs feuilles suent des microgouttelettes d'eau (côté terre) qui s'évaporent au moindre mouvement d'air, rafraîchissant d'autant le sol. Donc, selon les jours et l'humidité ambiante, la température sous ce toit herbeux sera plus proche de 19 °C, soit 5 °C de moins que si la terre y restait nu. On sait tous que

Copyright © 2016 Eyrolles.

NATURE DE SURFACE	POUR UNE LUMIÈRE BLEUTÉE	VALEURS D'ALBEDO	NATURE DE SURFACE	POUR UNE LUMIÈRE BLEUTÉE	VALEURS D'ALBEDO
Neige fraîche	blanc brillant	0,716	Sable gris pour ciment	gris soutenu	0,411
Glace translucide	blanc mat	0,680	Nuage d'orage	gris	0,400
Nuage d'altitude	blanc clair	0,600	Terre légère sèche	marron clair	0,400
Neige d'un mois	blanc grisé	0,556	Bouteille à vin	vert bouteille	0,396
Aluminium	gris clair	0,485	Herbe tondue	vert	0,381
Sable humide	beige soutenu	0,450	Rouge	rouge	0,373
Sable sec	jaune clair	0,450	Cacao	brun clair	0,316
Pré normand	vert tendre	0,447	Sang de bœuf	rouge bruni	0,246
Feuilles de platane	vert feuille	0,445	Terre noire sèche	noir mat	0,180
Ciment	gris	0,437	Forêt de feuillus	verts	0,180
Polenta	jaune clair	0,433	Herbe haute	vert	0,160
Feuille de romarin	vert sapin	0,431	Forêt de résineux	vert sombre	0,112
Eau profonde	bleu marine	0,426	Terre sombre mouillée	marron foncé	0,106
Brique	rouge rosé	0,424	Charbon	noir mat	0,070

la plante de nos pieds nus se refroidit en foulant l'herbe à l'aurore. Pourquoi ne pense-t-on pas plus souvent à l'intérêt de cette énergie réfrigérante pour sa maison ? Parce qu'on n'imagine pas couvrir son mur d'herbe ? Les anciens Provençaux, eux, utilisèrent ces propriétés des plantes.

2. Le feuillage

Ils avaient remarqué que les végétaux suivent parfaitement l'irradiation solaire. En d'autres termes : les feuilles s'étalent, abondantes, en août alors qu'elles sont encore minuscules au printemps. Elles perdurent jusqu'aux premiers froids, qu'ils s'avèrent tardifs ou précoces. Les mestres préféraient donc l'ombre des végétaux à celle des pare-soleils structurels. Ces derniers apportent la même ombre le 31 août que le 11 avril (pourtant équidistants du solstice : 70 jours). Or, au printemps, on a envie de chauffer une maison qui sort de l'hiver et la chaleur perçue des rayons solaires est encore faible tandis qu'à la fin août, les murs sont encore surchauffés et l'irradiation puissante. Un ombrage structurel donnera un maximum d'ombre le 21 juin, jour de l'équinoxe. Ce n'est pas le tempo idéal ni du point de vue des températures ambiantes ni du point de vue de l'irradiation solaire.

Le micocoulier

Le micocoulier est l'arbre qui apporte l'ombre la plus fraîche. C'était toujours aux branches basses de cet arbre (« l'arbre aux grives ») que les cultivateurs accrochaient leur gargoulette. De septembre à fin octobre, ses fruits attirent les grives et les merles pour le plus grand plaisir des chasseurs. Son bois souple et quasi imputrescible était très utilisé dans l'artisanat provençal, il fait de très bons fouets et de bonnes fourches. Cet arbre chanté par mistral n'était pas apprécié par les mestres : sa ramure fournie donnait beaucoup trop d'ombre en hiver. On ne le plantait donc jamais au sud d'une maison, mais volontiers à l'ouest.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Le mûrier

Le mûrier avait l'avantage d'être très productif. Après 1709, l'élevage du ver à soie était devenu la première source de revenus de toute la Provence. L'arbre présentait un défaut majeur : sa foliation était mal calée sur les saisons. C'est un arbre qui résiste bien aux frimas, il perd ses feuilles trop tard dans la saison et il fournit encore de l'ombre alors qu'il fait déjà froid. Les maîtresses de maison refusaient qu'on le plante à proximité de la façade sud de la maison, là où se font les tablées : ses fruits tachent tout, même la pierre.

Le tilleul

Les tilleuls symbolisaient l'amour conjugal. Celui à petites feuilles ne fournit pas assez d'ombre en été. Le tilleul à grandes feuilles, au contraire, assure une ombre relativement efficace et ses fleurs font la meilleure tisane. C'est un arbre « de rapport » ; il fut particulièrement étudié parce qu'il est très apprécié des abeilles, lesquelles sont indispensables à la culture. Il drageonne beaucoup, ce qui lui octroie une qualité remarquable à stabiliser restanques et éboulis, mais, comme les chênes, il préfère les sols riches et les altitudes supérieures à 500 m. Les maîtresses de maison lui reprochaient d'attirer les mouches, et les mestres trouvaient que ses branches faisaient beaucoup trop d'ombre en hiver : en général, on préférait le planter à flanc de colline, à cinquante mètres au moins des habitations.

Le « seigneur de Provence »

Le platane fut élu « seigneur de Provence ». On peut le planter dans une cour, puisque ses racines plongent et ne lèvent pas le sol. Il résiste bien au mistral. Son ombre est excellente, ses feuilles faciles à ramasser et il se taille aisément. Les tiges fines qui partent des branches maîtresses font peu d'ombre au soleil d'hiver. Taillé tous les six ans, il fournit un bois de bon diamètre pour l'âtre. Il n'attire pas les guêpes et les maîtresses de maison ne lui reprochent que de ne pas donner de fruits. Toute la Provence sélectionna le platane.

Comme les Romains (à partir de – 400), les Provençaux plantèrent des platanes devant le sud de leur maison pour lui assurer de l'ombre en été et un maximum de soleil en hiver. « L'arbre dont on a publié de si grands éloges » (Diderot) pousse plutôt rapidement, mais… à la vitesse d'un arbre. Quarante années sont nécessaires pour que son ombre bienfaitrice couvre la maison en été. Un platane mature était considéré comme une richesse et faisait partie intégrante de la valorisation d'une propriété. En attendant que ses petits-enfants aient son âge, le constructeur de la demeure devrait-il subir la canicule chaque été ?

Un platane et son ombrage devant une maison.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Pourcentage de l'irradiation solaire traversant une pergola mature, en vigne vierge											
100 %	100 %	100 %	90 % 70 %	45 %	20 %	20 %	20 %	30 % 45 %	70 % 90 %	100 %	100 %
jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juill	août	sept.	oct.	nov.	déc.

- L'ombrage est maximal durant les trois mois chauds : juin, juillet, août.
- L'ombrage est multiplié par deux entre avril et mai, puis à nouveau entre mai et mi-juin.
- L'ombrage est divisé par deux entre fin août et septembre, puis de nouveau entre septembre et octobre, s'adaptant à la progression de la baisse de l'irradiation.
- La pergola perd d'abord la moitié de ses feuilles quand « il commence à faire frais » et perd la dernière moitié quand « il commence à faire froid ».

Le platane

Le platane fournit une ombre bien calée sur les saisons : ses larges feuilles se développent très vite après les premières chaleurs d'avril, elles le couvrent à mesure que l'irradiation augmente. Dès la fin mai, il est en majesté, ses grandes feuilles apportant une ombre bienfaisante. Elles puisent l'eau profondément dans le sol et supportent des périodes de sécheresse marquées. En été, un arbre mature « évapotranspire » environ 450 litres d'eau. Sous un platane isolé dans une cour, on a observé des températures plus basses de 4 à 8 °C.

L'effet refroidissant est équivalent à celui de dix climatiseurs fonctionnant dix heures par jour. L'ombrage n'est donc pas sa seule action rafraîchissante. C'est un excellent chauffage réversible naturel. Il laisse passer la chaleur quand on en a besoin (jours froids) et nous en protège quand l'irradiation est forte. Il rafraîchit le jour mais pas la nuit, puisque son évapotranspiration commence à 21,4 °C.

Puis, l'automne avançant, le platane perd ses feuilles. Il le fait en deux épisodes. Il commence à se déplumer après le premier épisode prolongé de vents froids, vers septembre- octobre. Il achève de dénuder ses branches en quelques jours dès lors qu'une première semaine hivernale s'est abattue sur la Provence, généralement en novembre-décembre.

En d'autres termes, un platane fait peu d'ombre quand il ne fait pas encore très chaud, mais protège toujours du soleil violent d'été. Il offre encore un peu d'ombre quand le climat tiédit, mais laisse passer toute l'irradiation dès que le froid arrive.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Deux arbres oubliés

Deux espèces d'arbres plébiscitées par les anciens du Moyen Âge ont été totalement oubliées parce que, peu productives, elles mettaient trop de temps à développer leur qualité essentielle.
L'araucaria constituait le paratonnerre idéal. Son faîte pointu attirait les éclairs et ses racines profondes en diffusaient l'énergie loin sous le sol. Il fallait un petit siècle pour qu'il dépasse les arbres voisins. On plantait ce conifère à moins de cent mètres des abbayes ou des villae.
Le chêne blanc (encore appelé « pubescent » ou « truffier »), transplanté en rangées continues et parallèles sur la crête d'une colline, permettait d'arrêter les incendies de forêt (à une époque où les pins n'avaient pas encore conquis la Provence).

La vigne vierge fait une couverture sur la façade de cette maison..

3. La vigne vierge

Les toits des maisons de Provence avancent de la longueur des génoises. Ils ne débordent donc pas de plus de 50 cm à l'extérieur du mur. Or ces bâtiments sont hauts. L'avancée du toit n'ombrage donc pas la façade sud. Les rayons solaires étant nettement plus verticaux en été, beaucoup sont déflectés, leur apport calorique n'est donc moindre qu'en hiver. Mais si la couleur ocre de la paroi permet de capter le maximum de chaleur en hiver, elle ne réfléchit pas les rayons d'été. Ce n'est donc pas le bâti qui peut mettre les murs sud et ouest à l'ombre, ce sont les végétaux.

Aussi les mestres couvrirent-ils toutes les façades sud des maisons de vignes vierges. Elles se mettaient en place en trois ans et, quelques années plus tard, leurs feuilles protégeaient les murs de tous les rayons du soleil d'été. Aux premiers froids vifs, elles tombaient et laissaient un mur presque nu absorber toutes les calories du rayonnement d'hiver. Les feuilles de la vigne vierge présentent une face cirée, presque brillante (fort albédo), qui réfléchit une part des infrarouges solaires. Leur positionnement en écailles, au bout de longs pédoncules, permet le passage d'un léger courant d'air, continuel, le long de la façade.

Il assèche les molécules d'eau dégagées par l'évapotranspiration des feuilles. In fine, la paroi d'un mur sous une vigne vierge affiche une température de 14 °C plus basse que les endroits du même mur où il n'y en aurait pas. Les pics de température sont atténués de 28 % !

Cet amortissement de l'onde thermique par la vigne vierge s'ajoutant à celui dû à la paroi qui la porte, une amplitude des températures de 16 °C en été devient 5 à 6 °C sur la face intérieure du mur de la pièce à vivre. Les grandes feuilles lancéolées protégeaient aussi la paroi des rafales du mistral. Une vigne vierge assurait donc un grand confort à l'intérieur du foyer.

Autour du bâtiment

Les façades sud des maisons de Provence (hors les agglomérations) étaient donc couvertes de vigne vierge. Seuls les ouvrants restaient apparents dans la verdure, tous ceints d'un large trait

Copyright © 2016 Eyrolles.

Économie d'énergie

En 1994, McPherson a calculé que deux arbres caducs correctement disposés, l'un au sud et l'autre à l'ouest, permettent d'abaisser la consommation annuelle d'énergie d'une maison climatisée récente de 23 à 52 % (relevés effectués en Virginie, États-Unis).

de chaux qui protégeait des insectes rampants. Quand les ramures des platanes avaient atteint une taille suffisante, quand elles ombraient le bâti tout l'été, la vigne vierge dépérissait et était arrachée.

Cette stratégie d'emploi des végétaux était parfaite pour la façade sud, elle était aussi fréquemment utilisée en façade ouest quand la plantation d'un micocoulier s'avérait moins efficace. Restaient deux façades au bâtiment : l'est et le nord. À l'est, on appréciait les rayons qui réchauffaient après les nuits froides, même en été. On n'y plantait donc pas d'arbre haut. Par contre, on y appréciait quelques fruitiers. La violence du mistral s'abattait sur la façade nord. Il fallait donc la protéger d'Éole. La stratégie consistait à freiner le vent. Celui-ci devait rester traversé par un souffle d'air affaibli afin de ne pas créer de dépression qui aurait attiré des remous violents sur le bâtiment. On recourut aux cyprès. Soit on les plantait en groupes, comme des déflecteurs, soit on en faisait des rangées alignées, épaisses. La vallée du Rhône se couvrit de ces hautes haies parallèles qui empêchent le mistral d'emporter la terre arable.

Les haies de cyprès étaient préférables à un mur parce qu'elles mesuraient facilement une dizaine de mètres de haut et parce que leur frondaison laissait aussi passer un peu d'air. En ralentissant le vent, ces hautes haies évitaient qu'une zone de basse pression se crée à leur face sud. Ce faisant, elles avaient tendance à propulser la veine principale du mistral haut, au-delà de la maison. On taillait donc ces haies pour qu'elles restent les plus denses possible. Elles diminuaient l'impact du vent de 67 à 70 % sur une distance équivalente à cinq fois leur hauteur.

Les Provençaux se sentaient bien sous leur arbre. Ils y installaient une table et quelques sièges. La pièce principale de leur maison était petite : jusqu'aux frimas, ils habitaient donc dehors, dans la grande pièce ouverte que dessinait l'ombre de leur platane, protégé du mistral par le filtre des cyprès, là-bas, à l'arrière de la maison. On l'appelait « la doulce province »...

L'absorbtion de CO_2

Planter de tels arbres aujourd'hui nettoierait l'air à proximité de la maison de nombreux polluants atmosphériques (ozone, CO_2, dioxyde de soufre) tout en augmentant la production d'oxygène. Un adulte consomme la quantité d'oxygène produite par 1 à 2 m^2 de vigne vierge. Un platane type produit l'équivalent de la consommation quotidienne d'oxygène d'une trentaine de personnes et absorbe autant de CO_2 qu'ils en exhalent.

Copyright © 2016 Eyrolles.

8| Conception des parois

L'essentiel du confort des anciennes maisons du Sud de la France dépend du choix des matériaux employés. Les caractéristiques retenues dans la logique d'un mestre ne sont pas nécessairement celles que l'on met en avant aujourd'hui. Ainsi le ciment, le matériau constructif le plus employé actuellement, présente d'autres caractéristiques physiques que sa cohésion et sa portance : la manière dont la vapeur d'eau et l'eau liquide le traversent n'est pas négligeable.

SOLUTION BIOCLIMATIQUE 7. APPUIS DE FENÊTRE

L'intérieur des baies était passé à la chaux blanche, en Provence. Cette teinte permettait d'utiliser la réfraction de la lumière (albédo) sur la couleur claire et donc d'augmenter la luminosité captée. La partie inférieure des casquettes n'était pas plane (0° avec l'horizontale) : elle affichait une pente de 10 à 20°, ce qui permettait une meilleure illumination en hiver, puisque, par réfléchissement, elle augmentait la surface de captage des rayons solaires.

1. Tableau de fenêtre incliné

Au Moyen Âge, le verre coûtait très cher. Il fallait énormément de combustible pour le faire fondre (1 300 °C). Il exigeait des souffleurs très qualifiés et, fragilisé par les bulles d'air qu'il contenait souvent, risquait de casser en route lorsqu'on le transportait sur des chemins défoncés. Dans les habitats pauvres, on en utilisait le moins possible. Certains logements très pauvres n'avaient qu'une seule fenêtre, étroite, orientée plein sud. Les habitants tentaient d'optimiser au maximum la lumière captée. La baie était peinte en blanc, à

Fenêtre unique de la « maison du jardinier », à Lourmarin.

Copyright © 2016 Eyrolles.

la chaux. Les faces de l'embrasure réfléchissaient la lumière. Aussi, pour mieux éclairer, ils déformaient le tableau de la fenêtre. Voici celle de la maison du jardinier du château de Lourmarin : la face ouest de la baie est pratiquement perpendiculaire au verre pour se protéger de la chaleur des après-midis d'été ; la face est est largement creusée dans la paroi (plus de 20°) pour capter toute la lumière du matin ; le haut est aussi incliné d'une dizaine de degrés vers le haut pour utiliser tous les rayons d'hiver ; le bas s'incline de 20° pour réfléchir vers l'intérieur ceux du soleil bas (toute la journée l'hiver). On retrouve cet angle de 20° dans nombre de fermes isolées. Pourquoi ?

À partir de 48° de sa normale, le verre réfléchit déjà plus la lumière qu'il ne la laisse passer. Il en va de même pour les rayonnements infrarouges, calorifiques, contenus par les rayons solaires. À partir de 70°, la quasi-totalité des rayons est réfléchie. Les fenêtres étant généralement des plans verticaux, le soleil ne chauffe plus à travers la vitre à partir de 20° de la verticale. Le même phénomène se produit pour les rayons réfléchis par l'appui d'une fenêtre.

La fenêtre de cette maison bourgeoise de Ménerbes affiche aussi un tableau dissymétrique. Le tableau bas est incliné de 20°.

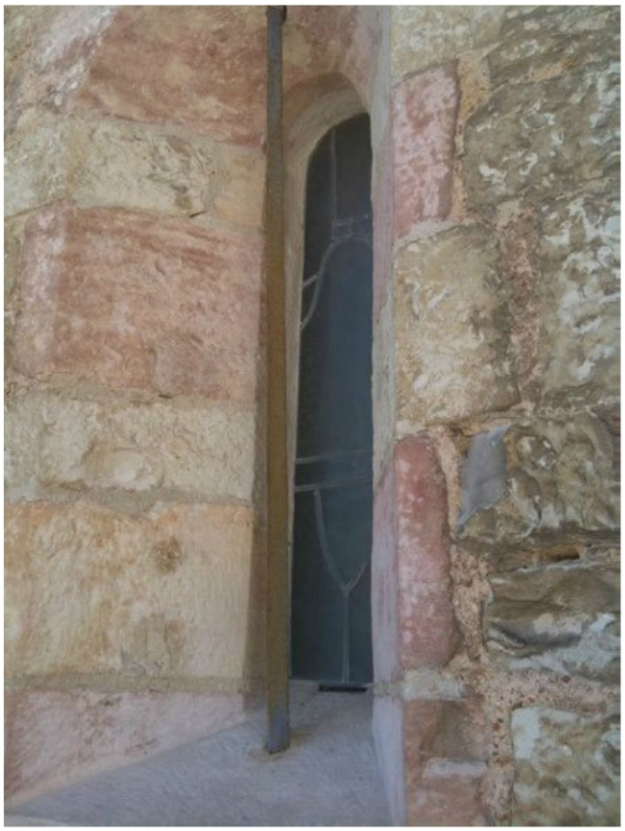
2. L'effet tuyère

En Provence, le vent est violent, mais ne souffle pas en continu. On ne peut compter sur le mistral pour assurer une ventilation rafraîchissante tout l'été. Aussi, les artisans locaux ont inventé un système qui leur permettait de fabriquer artificiellement un courant d'air. Un principe connu de tous les ingénieurs en mécanique : l'effet tuyère. Il suffit de capter de l'air frais par une fenêtre et de le laisser se diriger vers une zone chaude en prenant en compte le fait que les gaz se dilatent en se réchauffant.

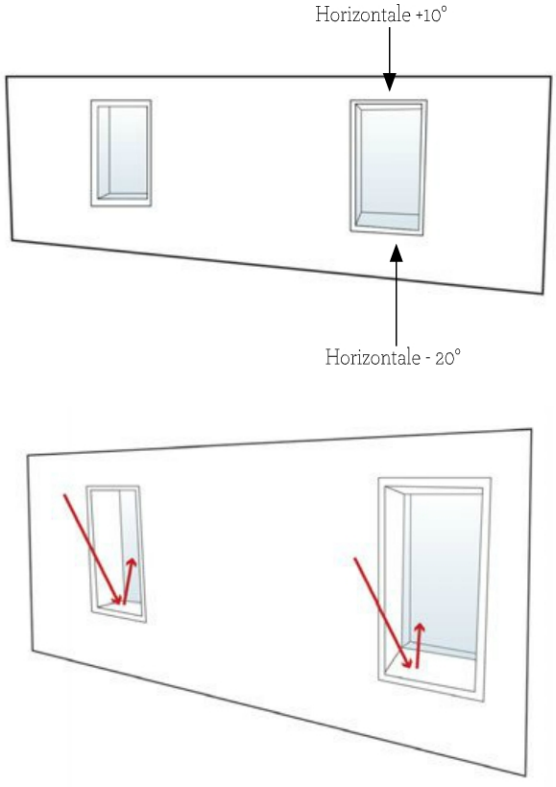
Pour éviter que le mistral ne pénètre dans les maisons, la fenêtre au nord était étroite. « Plus étroite que profonde », elle ne mesurait donc pas plus de 50 cm de largeur. Or, au nord de la maison, se trouvait une zone perpétuellement à l'ombre : la source d'air frais. Après la fenêtre se trouvait le cellier, auquel on accédait par une porte et dont la surface devait approcher les 2 m^2. Derrière cette porte se trouvait la pièce principale, plus chaude que le cellier mais beaucoup moins chaude que la façade sud de la maison. Entre la pièce et l'extérieur de la façade : deux fenêtres et la grande porte (soit au moins 4 m^2 de surface d'ouvrants). Entre la zone fraîche au nord et la zone chaude au sud, l'air se dilate à mesure qu'il passe par des ouvrants de plus en plus grands : c'est l'effet tuyère. À chaque fois que l'on ouvrira toutes les portes et fenêtres, que le mistral souffle ou pas, il se formera un courant d'air artificiel de la zone à l'ombre vers la zone ensoleillée. Si le cellier a un sol en terre battue ou s'il contient des liquides, leur évaporation augmentera l'effet rafraîchissant dans la pièce principale.

La transposition, aujourd'hui, de l'effet tuyère s'avère plus compliquée. Par besoin de luminosité, on ne voudrait pas d'une pièce intégralement sombre au nord, si on peut l'éviter. L'utilisation systématique de lumière artificielle va à l'encontre du

Copyright © 2016 Eyrolles.



Fenêtre de l'église Saint-Dominique. À 13 h 30 (heure solaire) au mois de juillet, soit 15 h 10 à nos montres, il fait très chaud du côté d'Avignon : le soleil se trouve à 60°. Un angle de 20° permet de réfléchir vers le vitrage les rayons du soleil ; lorsque celui-ci se trouve en dessous de 45°, avec un angle incident sur le verre toujours inférieur à 70°. L'utilisation d'appuis de fenêtre inclinés de 20° a un défaut : lorsque le soleil est au plus haut, il frappe presque perpendiculairement cette surface. Il faut donc que sa couleur soit la plus réfléchissante possible, si l'on ne souhaite pas que le matériau qui constitue l'appui de fenêtre absorbe trop de chaleur.



Un rayon solaire arrive à 60°, il est réfléchi par l'appui de fenêtre et pénètre à l'intérieur (son angle incident est inférieur à 70°).

Un rayon solaire arrive à 60°, il est réfléchi par l'appui de fenêtre et est réfléchi par le vitrage. Puisque son angle incident est supérieur à 70°.

La surface de vitrage est la même mais l'irradiation pénétrant dans la maison en été est inférieure si l'appui de fenêtre est incliné.

principe de frugalité des consommations de l'habitat bioclimatique. Mais, s'il y a plusieurs fenêtres au nord, rien n'oblige d'en ouvrir plus d'une. Il suffit que la surface de la fenêtre ouverte soit largement inférieure à celle de la porte. Puisque le courant d'air se déplace toujours dans la même direction, il est recommandé que la porte ouvre vers la pièce principale pour éviter « les portes qui claquent ». La pièce principale au sud est plus vaste et la surface cumulée de ses ouvrants plus importante : un courant d'air puissant se formera quand on le désirera et il traversera la maison du nord au sud. Dans une maison bioclimatique, les jours d'été, l'air ambiant est nettement plus frais que celui de l'extérieur. Les masses thermiques y veillent. Au niveau des ouvrants de la façade sud, la différence de température (entre la face intérieure et la face extérieure de la paroi) peut atteindre 15 °C. Or la même quantité d'air occupe un volume près de cinq fois plus important à 35 °C qu'à 20 °C. Si la section de l'ouverture dans un mur d'une cinquantaine de centimètres d'épaisseur

Copyright © 2016 Eyrolles.

restait constante, alors elle freinerait la dilatation de l'air. Par contre, l'effet tuyère sera entretenu si la surface de l'ouvrant au droit du mur intérieur est inférieure à sa surface au droit du mur extérieur, aussi y a-t-il lieu de concevoir des appuis de fenêtre qui soient évasés.

3. Renouvellement d'air

Les règlements sanitaires imposent un renouvellement de 15 m^3/h/personne (mais le Code du travail demande 25 m^3/h/personne). Il s'agit d'apporter suffisamment d'air frais pour que le rapport O_2/CO_2 dans l'air intérieur reste optimal. Les architectes sont tenus de prévoir des ouvrants d'une surface suffisante pour respecter ces valeurs cibles. Ceux qui ne se reposent que sur des ventilations mécaniques gagneraient à prendre soin de corriger les rendements promis par les fabricants. En effet, les filtres des double-flux devraient être changés tous les quatre mois, surtout en été : le filtre qui nettoie l'air entrant se bouche toujours plus vite que celui de l'air sortant, en ville comme à la campagne. En conséquence, le volume d'air neuf étant inférieur à celui qui est chassé du logement, il se crée une dépression relative par rapport à l'air extérieur. Ce qui tend à faire entrer de l'air extérieur dans l'habitat, par toutes les microfuites du bâti ou à chaque ouverture de porte. L'encrassement plus rapide du filtre de l'air entrant implique donc une tendance à la pénétration d'un air qui n'a pas été filtré, voire de l'extérieur. Les masses thermiques y veillent.

Combien d'habitants font vérifier tous les ans la tension de la courroie de leur ventilation ? Combien en nettoie le caisson à l'alcool chaque année ? Ceux qui ne respectent pas ces règles (l'immense majorité) ne renouvellent pas autant l'air de leur logement qu'ils le croient. Des enquêtes ont montré qu'un an sans entretien d'une ventilation peut aisément faire diminuer les volumes d'air entrant de plus de 40 %.

Malkaf

L'Égypte connaît un vent continu, lent mais puissant : la masse d'air (relativement) fraîche qui surplombe la mer Méditerranée se déplace vers les surfaces chaudes du Sahara. Depuis toujours, les artisans captent ce souffle pour ventiler leurs maisons. Ils en profitent pour les rafraîchir. Les capteurs sont tous orientés au nord. Plus ils se trouvent haut, moins ils reçoivent de sable et de poussière. Une fois que l'air a pénétré dans le bâti, on le fait passer le long de pots en terre cuite (poreuse) contenant de l'eau ou au-dessus d'un bassin, ou (mieux encore) sur du charbon humidifié. Le souffle fait évaporer l'eau, à l'ombre, et se rafraîchit considérablement. Il suffit alors de lui faire traverser les pièces à vivre avant de le diriger vers un point haut et chaud : le courant d'air s'installe et s'auto-alimente. Les Égyptiens appellent malkaf ce type de climatisation naturelle. Ils ont utilisé ce procédé avec une vasque de charbon humide en 1945, pour une école située près de Louxor ; il fonctionne toujours et permet de rafraîchir les classes de 14 °C au plus chaud de l'été.

Par ailleurs, ces valeurs réglementaires datent de plus de trente ans. On ne savait pas encore, alors, combien les colles (des moquettes ou des panneaux de bois aggloméré, par exemple) dégagent de formaldéhydes. On entre là dans le domaine d'une autre réglementation, celle du Code de l'environnement de 2008. Il prévoyait un taux maximum de ce cancérogène de cinquante microgrammes par mètre cube d'air intérieur.

Le Haut Conseil de la Santé publique a édicté cette valeur comme limite à ne pas dépasser et demande que les bâtiments neufs ou rénovés ne dépassent pas les dix microgrammes de formaldéhydes par mètre cube d'air intérieur à partir de 2019. En ne se référant plus au CO_2 émis par les habitants mais aux formaldéhydes provenant des aménagements du logement, les volumes d'air à renouveler diffèrent totalement. Un appartement de 60 m^2 représentant environ 150 m^3, les logements témoins des constructeurs

Copyright © 2016 Eyrolles.

actuels dégagent une quantité de formaldéhydes qui, pour atteindre la valeur cible de 50 µg/m^3, demande un renouvellement de 0,6 m^3 par heure. L'exigence passerait donc à un besoin de ventilation de 90 m^3/h, qui deviendra 450 m^3/h en 2019 : un volume trente fois supérieur aux exigences actuelles ! Le coût des ventilations mécaniques (consommation électrique de ventilateurs puissants, renouvellement des filtres, compensation des ponts thermiques, contrats d'entretien) est donc directement lié au choix des matériaux de décoration fait par chacun.

L'isolation

Une fenêtre isole a priori moins bien qu'un mur. L'image prise par une caméra infrarouge colore toujours les ouvrants en plus jaune que les parois. Soulignons que les grandes évolutions techniques des fabricants de fenêtres les plus pointus rendent de moins en moins flagrante cette distinction.

On nomme Uw (pour Uwindow) le facteur qui exprime la quantité de chaleur qui traverse une fenêtre fermée de 1 m^2 en une seconde pour une différence de température normalisée entre les deux faces de ladite fenêtre. Ce facteur caractérise l'efficacité thermique d'une fenêtre et apparaît dans les catalogues de tous les fabricants. Considérons (pour simplifier) qu'il représente la somme du Uf (pour Uframe), qui concerne les transferts d'énergie à travers le cadre de la fenêtre, et du Ug (pour Uglass), qui se réfère à la perméabilité thermique du vitrage.

Ponts thermiques

L'enveloppe isolante du logement représente un cocon protecteur relativement étanche, traversé par deux ponts thermiques ponctuels majeurs : les conduits de la ventilation. Ces ponts thermiques sont d'autant plus puissants que l'air transporté est humide.

Le facteur Ug d'un vitrage dépend du nombre de couches de verre qui le composent, des traitements de leurs surfaces, du gaz qui les sépare ainsi que de l'espacement entre ces vitres. Ces quatre points recouvrent une grande quantité d'innovations qui se sont imposées au cours des dix dernières années. Celles-ci ont, en particulier, largement modifié le facteur solaire des vitrages, c'est-à-dire les proportions d'énergie transmise, réfléchie et absorbée pour différentes longueurs d'onde du rayonnement solaire.

Un vitrage optimisé pour les régions chaudes ne laissera passer que le spectre visible du rayonnement solaire et bloquera toutes les autres longueurs d'onde. Une fenêtre optimisée pour l'hiver laissera passer un maximum de chaleur vers l'intérieur, mais bloquera les infrarouges de grande longueur d'onde. Elle transmettra aussi un maximum de luminosité (on peut même lui demander de filtrer plus ou moins de bruit). La lumière nous arrive sous forme d'ultraviolets et d'infrarouges. Le spectre lumineux auquel nous sommes sensibles ne comprend pas les infrarouges à grande longueur d'onde. Ce sont ceux émis par les matériaux chauffés à travers la vitre. En les bloquant, le vitrage provoque un effet de serre à l'intérieur du bâti, exactement ce que l'on recherche en hiver (mais surtout pas en été). Une fenêtre optimisée pour l'hiver devra donc laisser passer la lumière pour les longueurs d'onde inférieures à deux ou trois microns et rester à l'ombre durant l'été.

Dépôt métallique dans un double vitrage

Dans le cas d'un simple vitrage : si les corps lourds situés dans la maison émettent des infrarouges de grande longueur d'onde, ils vont finir par réchauffer le vitrage de la fenêtre ; la chaleur va se transmettre au sein du verre et soit rayonner soit être refroidie par la convection du vent.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Dans le cas d'un double vitrage : le verre intérieur va réchauffer le gaz qui se trouve entre les deux verres et qui va finir par réchauffer un peu le verre extérieur... et perdre de la chaleur par rayonnement ou convection. La perte de chaleur dans un double vitrage se fait donc essentiellement par rayonnement d'un verre chaud (intérieur) vers un verre froid (extérieur). Pour y remédier, on joue sur le gaz contenu entre les deux lames de verre (l'argon diminue nettement plus ces échanges que l'air). On peut aussi augmenter l'écartement entre les deux lames de verre, mais cela ne fonctionne que jusqu'à 15 mm : ensuite, il se produit un phénomène inverse d'augmentation de la transmission thermique. Les scientifiques ont donc inventé un traitement de surface du verre particulièrement efficace : la couche à basse émissivité. Il s'agit d'une couche métallique, souvent en argent, posée à chaud sur le verre. Extrêmement fine, elle est transparente. Elle a la particularité de bloquer une partie du transfert par rayonnement. Ces vitrages portent des noms variés : « vitrage à isolation renforcée », « vitrage super isolant », « vitrage Low-E » ou encore « vitrage à haut rendement ».

Selon l'endroit où est placée cette couche d'oxydes métalliques, les propriétés du vitrage se révèlent très différentes. Si la couche basse émissivité se trouve à l'extérieur du verre interne (face 3), alors la chaleur solaire passe à travers le double vitrage, mais la chaleur absorbée par la vitre intérieure sera émise vers l'intérieur du logement. C'est la solution idéale pour apporter le maximum de chaleur solaire à l'intérieur.

Si la couche basse émissivité se trouve à l'intérieur du verre externe (face 2), alors la chaleur solaire absorbée par la vitre extérieure sera émise vers l'extérieur. C'est la solution idéale pour éviter les surchauffes d'été.

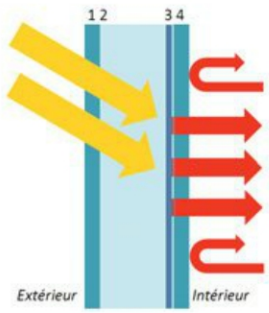
Efficacité du double vitrage

Alors qu'un double vitrage 4/16/4 ordinaire affiche un Uw de l'ordre de 2,8, un double vitrage 4/15/4 argon basse émissivité atteint facilement un Uw de 1,3 ! Autrement dit, un vitrage de qualité s'avère deux fois plus isolant qu'un vitrage standard (il est aussi plus onéreux).

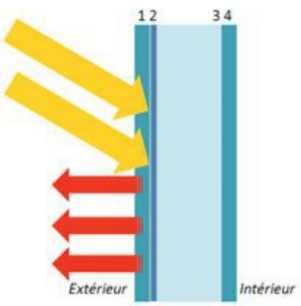
Le cadre d'une fenêtre est caractérisé par son Uf. Ce niveau d'isolation est directement impacté par les températures qu'il y a de chaque côté de la fenêtre : si l'air dans le logement avoisine les 19 °C, le besoin de chauffage sera moindre si la température immédiatement derrière la fenêtre est à 10 °C que si elle se situe, par exemple, à 0°C. Or, si l'appui de fenêtre est horizontal, il va retenir des molécules d'eau dans l'irrégularité de l'enduit. Cette eau fraîche s'évaporera au moindre souffle d'air et... la température de l'air extérieur, au ras du cadre, peut tout à fait diminuer de 10 °C.

Joints de fenêtre

On ne pose plus les fenêtres comme nos parents : « quatre équerres et du plâtre pour boucher les trous ». On ne se contente plus d'un trait de silicone pour assurer l'étanchéité à l'eau, comme on le faisait encore il y a dix ans. Il est devenu impensable que des fenêtres aussi complexes et aussi onéreuses soient posées avec des matériaux qui n'atteignent pas des performances techniques élevées.



Vitrage pour se protéger des hivers trop froids : dépôt métallique sur la face 3



Vitrage pour se protéger des étés trop chaud : dépôt métallique sur la face 2

Copyright © 2016 Eyrolles.

« Une écharpe orangée fait du bien au teint »

Les couleurs orangées sont plus chaudes. On a envie de chaleur en hiver. Or la lumière du jour y est plus diffuse et plus bleutée. Si le vitrage de la fenêtre est précédé d'un appui de fenêtre enduit à la chaux et si la teinte de l'enduit contient une nuance d'orangé, alors les rayons solaires d'hiver qui seront réfléchis par cette surface apporteront une lumière plus orangée dans les logements… et les ambiances seront plus chaleureuses.

Aujourd'hui, les DTU (Documents techniques unifiés) imposent aux poseurs de fenêtres d'utiliser des compribandes à base d'élastomères pour assurer une étanchéité parfaite et durable. Par ailleurs, chaque fenêtre représente un trou dans la paroi. L'isolation à l'air y est particulièrement délicate. Des poussières qui s'accumuleraient sous le cadre pourraient provoquer des désordres majeurs. Cela d'autant plus si elles sont apportées par de l'eau, encore plus si celle-ci a dissous des composés chimiques agressifs pour la membrane d'étanchéité à l'air ou les compribandes. Ces produits peuvent provenir de la pollution environnementale (des pesticides dissous, des acides ou des « fibres fines », par exemple). Les poseurs professionnels le savent bien et protègent méticuleusement cette zone. La qualité de leur travail sera d'autant mieux préservée que l'on s'emploiera à éviter que de l'eau puisse s'infiltrer jusqu'au cadre des fenêtres. La méthode la plus simple consiste donc à prévoir une légère pente vers l'extérieur de l'appui de la fenêtre.

La bioclimatique est affaire de détails. Un élément aussi banal (et répétitif) qu'un appui de fenêtre mérite notre considération.

Compromis

Une inclinaison de 20° interdirait de poser des pots de fleurs sur l'appui de la fenêtre. Pour notre monde de compromis, on remarquera qu'une pente de 5° et un enduit lisse n'apportent que des avantages.

SOLUTION BIOCLIMATIQUE 8. MATÉRIAUX

1. Matériaux modernes

Imaginons un mestre du XVII^e siècle feuilletant le catalogue d'un marchand de matériaux de construction d'aujourd'hui. Il serait étonné et n'aurait jamais imaginé contruire avec du béton, de l'acier, du verre ou des isolants ! La foule de produits disponibles pourrait l'émerveiller, mais il aurait certainement une lecture de l'offre différente de la nôtre. Son approche thermique et hygrométrique des matériaux nous étonnerait certainement autant que ses raisonnements simplistes. Par respect, nous reconnaîtrons qu'il ne manquait pas de bon sens même s'il était peu éduqué. Supposons que ce mestre se concentre sur les quatre produits qu'il a considérés essentiels dans nos modes de construction actuels : ciment, acier, laines minérales et verre.

Son œil intéressé balayera les joint, colle, polyuréthane, laine de bois, film perspirant, aluminium, PVC, visserie, ventilation double flux, caméra thermique, logiciel de simulation, PAC, chauffage performant, matériel électrique, plomberie et autres inventions merveilleuses, mais nous prenons pour hypothèse qu'il ne s'y attardera pas.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Le ciment

C'était le matériau de la reconstruction de l'après-guerre. Il était bon marché. Sa mise en œuvre autorisait l'emploi d'une main-d'œuvre peu qualifiée. Ses remarquables propriétés permirent de résorber en quelques décennies l'essentiel du déficit cruel de logements, engendré par la Seconde Guerre mondiale. Les politiques avaient besoin d'un produit (qui convienne à l'industrie américaine) et qui permette de construire « vite et pas cher » dans la situation du moment. À compter de 1945, toutes les constructions neuves de l'arc méditerranéen, ou presque, furent édifiées en confiant leurs structures au ciment. Le béton forme un agrégat de minéraux et de liants. Sa composition reste minérale : silice, alumine et carbonate de chaux. Notre mestre serait ébahi par la rapidité de mise en œuvre. Il serait même étonné que l'on puisse construire sur des fondations sans attendre une année. Il noterait qu'il s'agit d'un matériau perméable aux calories, qui laisse passer l'air, l'eau et la vapeur d'eau. Il verrait que nous disposons d'enduits qui peuvent assurer son étanchéité. Il regarderait avec attention le comportement de l'eau dans un mur, il en conclurait que le séchage du ciment n'est pas homogène et que l'eau s'y déplace essentiellement par capillarité.

Il jugerait décevante la qualité de la mise en œuvre des blocs d'agglomérés. Il regarderait avec attention ce que nous appelons « ponts thermiques » dans nos constructions. Le mestre s'intéresserait à nos méthodes de mise en œuvre pour chercher celle qui limiterait les désordres tout en étant des moins onéreuses. Bref, il aurait une approche ni très scientifique ni très technique. C'est qu'il savait à peine lire et écrire. Il avait longtemps travaillé aux champs et avait passé dix ans à apprendre à édifier. Il ne savait construire des maisons que près de chez lui, rarement à plus de dix lieues de son domicile. Les gens se le recommandaient parce qu'on disait qu'il créait des foyers où il faisait bon vivre (« ses maisons étaient confortables »).

L'acier

Dans le couple ciment/acier, le fer à béton est celui qui supporte les tensions. Comme tous les métaux,

Caractéristiques du ciment	
Composition	- Agrégats minéraux et liants
Quelques caractéristiques	- Perméable aux calories - Séchage non homogène (capillarité)
Attention aux points ci-contre :	- Qualité de mise en œuvre - Pérméable aux gaz (vapeur d'eau) - L'étanchéité est apportée par l'enduit
Matériaux similaires	- Béton armé - Béton banché - Parpaing - (...)

Caractéristiques de l'acier	
Composition	- Alliage métallique de fer et de carbone.
Quelques caractéristiques	- Extrêmement conducteur - Transmet quasiment instantanément les calories - Assure la résistance en tension des structures par les fers à béton (sismique).
Attention aux points ci-contre :	- Craint la carbonatation - Perméable aux gaz (vapeur d'eau)
Matériaux similaires	- Aluminium - Cuivre - etc.

Copyright © 2016 Eyrolles.

À noter

L'acier doux des « fers à béton » conduit mille fois plus l'énergie qu'un isolant de base et cinq fois plus que le béton.

l'acier est infiniment conducteur. Il transmet très rapidement des calories du chaud vers le froid. Le fer à béton est le matériau qui supporte les tensions. Sa courbe de dilatation est similaire à celle du béton. Il craint la carbonatation. En Provence, les nouvelles normes sismiques l'imposent en quantité. Notre mestre remarquerait que nos modes constructifs actuels lient les fers à béton de tout un bâtiment, ce qui a tendance à homogénéiser leur température, des fondations jusqu'au toit. En utilisant des fers à béton de forte section (2 cm^2), on peut chauffer une paroi nord depuis une paroi sud. Le cuivre est 16 000 fois plus conducteur qu'un isolant. Si un fil électrique (3 mm^2) traverse une paroi isolée, il annule l'effet isolant de tous les constituants de ladite paroi pour l'équivalent de la surface d'une feuille A4. Pire encore : un tuyau d'eau qui, à travers un mur, alimente un robinet de jardin constitue un pont thermique ponctuel nettement plus puissant. Notre mestre savait que si les métaux restituent rapidement au milieu ambiant les calories dont ils sont chargés, ils les absorbent encore plus vite. Ils condensent l'eau quand il fait froid et humide.

Les laines minérales

Depuis que l'amiante a été reconnu cancérigène et qu'il a été interdit, laine de roche et laine de verre ont accaparé le marché. Après les précurseurs allemands, nous découvrons largement les vertus des isolants à base de végétaux. Leur part de marché est encore faible. Les polystyrènes et autres produits issus de la chimie occupent presque le solde. Les laines minérales font d'excellents isolants lorsqu'elles sont manipulées avec précaution. Leur succès repose sur leur coût, mais aussi

Caractéristiques des laines minérales	
Composition	- Fibres minérales de silicates vitreuses
Quelques caractéristiques	- Excellents isolants SI ils sont protégés
Attention aux points ci-contre :	- Très fragiles - Craignent les chocs et l'humidité
Matériaux similaires	- Laine de roche - Laine de verre - PSF (graphité) - (...)

sur une méprise : elles sont de roche et de verre, on les croit solides alors qu'elles sont infiniment fragiles (un souffle de vent casse aisément des échardes de verre de quelques microns d'épaisseur). Notre mestre aurait été surpris d'apprendre qu'en réalité, elles sont maniées sans délicatesse. Mais il aurait été ravi que notre civilisation ait inventé des isolants, lui qui ne disposait que de roseaux. Il n'aurait pas manqué de noter la rapide baisse d'efficacité des isolants minéraux lorsqu'ils se trouvent en présence de vapeur d'eau.

Verre et roche n'isolent pas, ce sont les bulles d'air immobile coincées entre les fibres de la laine minérale qui isolent. Or l'air est soluble dans l'eau : 5 % d'humidité font perdre 50 % de l'efficacité thermique d'une laine de verre.

Lorsque l'humidité provient de la face la plus chaude d'une paroi, les laines minérales isolent jusqu'à trois fois moins que si elle provenait de sa face froide.

Le verre

Le mestre connaissait le verre. C'est un matériau minéral, transparent à la lumière et étanche aux molécules d'eau. Il ignorait que le verre avait la particularité de filtrer les radiations. En l'occurrence, il laisse très peu passer les vibrations de

Copyright © 2016 Eyrolles.

Caractéristiques du verre	
Composition	- à base d'oxyde de silicium (sable)
Quelques caractéristiques	- Transparent à la lumière - Faible émissivité - Étanche à l'humidité - Conducteur thermique - Transparent au rayonnement solaire - Ne laisse pas passer les grandes longueurs d'onde (infrarouge, effet de serre) - Peut être conditionné en double et triple vitrage et avec argon
Attention aux points ci-contre :	- joints des ouvrants (dormants)
Matériaux similaires	- Polycarbonate - Plexyglass

grande longueur d'onde (le rayonnement infrarouge, par exemple). Le mestre aurait été éberlué de voir combien ce produit était devenu moins cher qu'à son époque. Les huisseries ont beaucoup évolué et sont devenues très techniques. La qualité des joints que nous utilisons aujourd'hui lui paraîtrait extraordinaire. Par contre, il n'aurait pas imaginé voir des plans présentant de grandes fenêtres au nord, surtout dans le couloir rhodanien. Sur cette paroi, lui ne plaçait que des fenêtres étroites. Pour un mestre, la grande majorité des fenêtres devaient donner au sud. Si elles recevaient 300 W en été, elles recevraient 500 W en hiver (du fait de l'angle d'incidence des rayons solaires, donc de la réflexion sur le verre). Aussi, il ne comprendrait pas qu'on puisse négliger ce principe à l'heure des énergies chères. Alors le mestre du XVII^{e} siècle aurait tenté de comprendre ce qu'il aurait pu faire de ces matériaux merveilleusement performants s'il avait conçu une maison aujourd'hui.

Sauf caractéristiques climatiques locales très particulières, il aurait placé l'essentiel des ouvrants soit vers le sud soit vers des zones artificiellement tempérées (patios, cours). Il aurait mis en place un système permettant de rafraîchir le mur sud en été (végétaux, ombrage) et aurait vérifié qu'il capterait le maximum possible d'irradiation solaire en hiver.

Raisonnements simplistes du mestre

• L'air chaud monte, donc la chaleur d'une pièce sera surtout captée par son plafond. Le ciment conduit d'autant plus les thermies qu'il est ferraillé, donc cette énergie se diffusera dans toute la dalle. Si on a utilisé beaucoup de fer à béton, la chaleur y sera la même en tous points. Le béton armé va la transmettre jusqu'aux parois, créant autant de ponts thermiques linéiques. Le mestre n'avait jamais eu l'expérience de matériaux présentant ces caractéristiques, mais il savait ce que son maître lui avait enseigné pendant des années : on place des pièces tampons tout autour de la maison, sauf devant sa façade sud. En d'autres

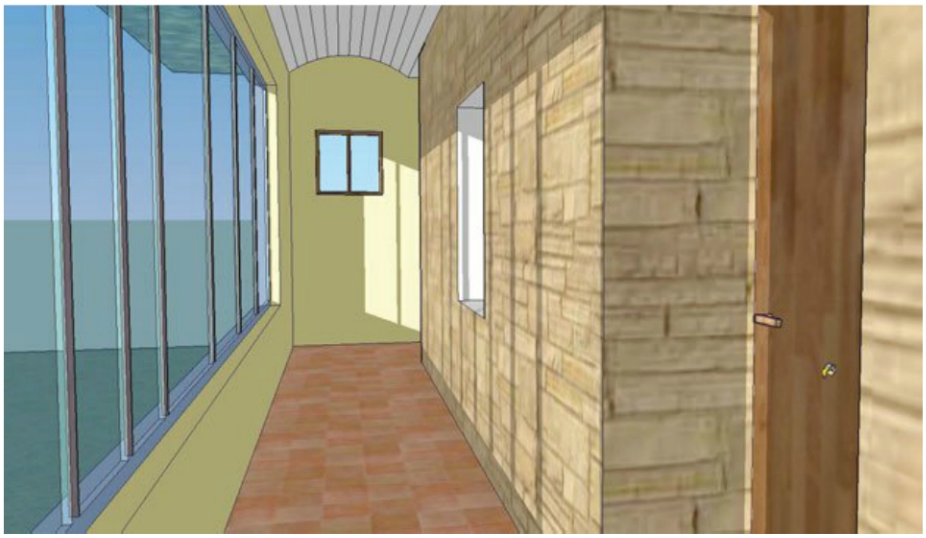
À noter

Les isolants sont fragiles, très fragiles. Aucun ne peut être garanti plus de vingt ans. « Il faut protéger les isolants ! » est une maxime indispensable pour la conception d'un habitat passif.

Conductivité/humidité

Plus un matériau est humide, plus sa condutivité thermique est grande et plus son isolation est faible.
Le béton capte beaucoup l'humidité. Son λ passe de 0,96 à 1,60 lorsqu'il est humide. Le béton cellulaire et bien plus résistant à l'humidité et la brique encore plus.
Exemple de la terre :
• Terre sèche λ = 0,17
• Terre +10% d'eau : λ = 0,5
• Terre + 20% d'eau : λ = 0,8

Copyright © 2016 Eyrolles.



Une véranda donnant au sud, séparée d'un mur lourd par un couloir. Ce principe est souvent utilisé en rénovation de bâtiments anciens. Le soleil d'hiver, bas, éclaire à plein le mur, qu'il échauffe durant toute la journée. Durant la nuit, la masse thermique de ce mur va restituer sa chaleur, comme une bouillotte : vers le couloir en s'opposant à la fraîcheur nocturne, vers les pièces d'habitation comme un chauffage puissant mais doux. Même en hiver, l'effet de serre dû aux vitrages plein sud peut être violent. Il faut donc prévoir une fenêtre au plus haut du couloir, à l'une de ses extrémités, pour pouvoir évacuer l'excès éventuel d'air chaud.

termes : en été, la dalle du plancher fait un grand pont thermique qui permet d'évacuer du logis un éventuel excès de chaleur. Mais ce système ne fonctionne efficacement que si la paroi sud se trouve perpétuellement plus fraîche vers l'extérieur de la maison (ce qui est le cas lorsqu'elle est couverte de vigne vierge). Le ferraillage permet donc d'évacuer une grande quantité de chaleur de la pièce à vivre, en été (mais pas son humidité).

• Une paroi exposée au soleil d'hiver s'y chauffe. Or le métal transmet les thermies : si l'on chauffe un chaînage en acier, il transmettra sa chaleur tout du long. L'onde thermique s'amortira à mesure qu'elle cédera de l'énergie au béton qui l'entoure. Le mestre venait d'apprendre que cet amortissement était inversement proportionnel au carré du diamètre des fers à béton utilisés (il avait surtout retenu qu'un fer à béton de 2,5 cm^2 de section abandonnait environ 1 % de son énergie au béton, pour chaque mètre linéaire traversé). Il avait appris que la lumière traversait le verre, mais que sa composante la plus riche en énergie restait ensuite prisonnière derrière le verre : en utilisant le filtre à infrarouges d'une vitre, on crée un effet de serre. En posant ce vitrage devant un mur capteur, on le protège aussi des mouvements d'air, donc des pertes par convection. Aussi, grâce à l'extrême efficacité de ces matériaux, on peut construire des murs capteurs, même à la latitude de la Provence. Grâce à des fers à béton de forte section, on pourrait même chauffer les pièces nord en utilisant la chaleur d'un mur capteur orienté au sud.

• Le verre laisse passer les radiations solaires. Un objet chauffé irradie dans les infrarouges (une pierre sortie du feu irradie de la chaleur). Le verre bloque le passage des ondes infrarouges qui se réverbèrent indéfiniment, en libérant de l'énergie, créant un effet de serre. Donc un objet lourd (structurel ou décoratif) placé derrière une fenêtre va se comporter comme un chauffage à accumulation pour la pièce. Si la fenêtre est placée de telle façon que l'objet soit chauffé en hiver mais rafraîchi en été, alors on a créé une bouillotte qui

Copyright © 2016 Eyrolles.

prendra soin du confort thermique de la maisonnée (eau bouillante en hiver, eau glacée en été).

Accessoirement, si cette masse thermique se trouve à l'intérieur de la fenêtre, elle accumule de la chaleur le jour. Le soir, elle réchauffe une couche d'air devant le vitrage. Elle tiédit la surface intérieure de la vitre. Elle diminue les mouvements de convection effectués par l'air dans la pièce et tempère l'atmosphère. Bref : la nuit, lorsqu'il commence à faire frais, la masse thermique réchauffe la pièce tout en diminuant les déperditions.

De manière générale, une masse thermique importante située derrière une grande fenêtre accumule la chaleur du jour pour la restituer à la nuit tombée. Il suffit donc qu'un ouvrant soit abrité du soleil direct en été mais illuminé en hiver pour que la décoration d'une maison permette de nombreuses applications de ce principe : des pots de fleurs placés à l'intérieur de la fenêtre de la cuisine ; un banc en pierre positionné derrière une fenêtre, à l'intérieur du logis ; un mur de briques pleines chauffé par le soleil bas d'hiver...

Pour des informations plus précises concernant l'utilisation des matériaux actuels et en particulier des isolants, voir « Les parois », en annexe 1.

Une jardinière placée devant une fenêtre

Une jardinière s'apparente à un contenant en terre cuite (poreux) empli de terre (masse thermique). L'été, on plaçait la jardinière (de plantes aromatiques ?) devant la fenêtre de la cuisine. En hiver, on rentrait les pots de fleurs à l'intérieur, avant les premiers gels. Placer des pots dans la profondeur de la fenêtre en été (La jardinière se trouve à l'ombre de l'avancée de la fenêtre. Les plantes sont arrosées. L'eau contenue dans la terre de la jardinière s'évapore, d'autant plus que l'air extérieur est sec. Les plantes génèrent de la fraîcheur par leur évapotranspiration dès 21,4 °C.) :

- rafraîchit l'air situé devant la vitre. Si on ferme des volets devant la jardinière, alors l'air emprisonné entre les volets et la fenêtre sera encore plus rafraîchi, ce qu'apprécient les plantes ;
- atténue les échanges thermiques entre la fenêtre (refroidie par l'air intérieur du logement) et l'air extérieur. Placer des pots à l'intérieur de la fenêtre en hiver (en hiver, la jardinière reçoit les rayons du soleil bas à travers la vitre. Sa masse thermique monte en chaleur. La nuit tombée, celle-ci émet des ondes infrarouges et, par irradiation, chauffe légèrement l'air devant la fenêtre. Ce faisant, elle limite la convection de l'air sur la paroi tiédie de la vitre.
- fait diminuer la désagréable sensation de « paroi froide » due à la vitre ;
- atténue les échanges thermiques entre la fenêtre (refroidie par l'air extérieur) et l'air chauffé du logement ;
- contribue à réguler l'humidité du logement.

2. Matériaux de construction anciens

Le mestre, qui semble si mal comprendre nos matériaux modernes, connaissait bien ceux de son époque. Il y en avait moins et ils étaient plus rudimentaires. Nous les utilisons toujours, mais nous en avons oublié bien des aspects.

Les clous

Les clous étaient forgés. Tous avaient une tête et leur coupe était généralement triangulaire. Sortis de la forge, façonnés au marteau, leurs trois arêtes n'étaient jamais parfaitement lisses : ils accrochaient bien dans le bois. S'il fallait fixer deux pièces inamovibles, on mouillait la pointe d'un clou avec un acide (on cite souvent le citron, mais en réalité ils se servaient d'une matière première plus fréquente sur les chantiers, l'urine) : dans le bois, la pointe de fer va donc rouiller et, en rouillant, elle augmentera considérablement de volume. Les deux pièces seront donc bloquées entre la tête du clou et la boule de rouille qu'est devenue sa pointe.

Copyright © 2016 Eyrolles.

On ne pouvait retirer ces clous « trempés » qu'en arrachant le bois. On n'avait pas l'option, comme avec une vis d'aujourd'hui, de la dévisser. Aussi, les montages temporaires se faisaient au clou point trop planté : on veillait à choisir ceux dont la tête était la plus épaisse.

Le sable

Complément indispensable à la chaux, il ne fallait surtout pas en ôter les fines : on ne le lavait pas. Pour les constructions en moellons bloqués à la chaux, on choisissait un sable qui produisait un bruit sonore lorsqu'on le frottait entre ses paumes. C'était donc un sable propre de toute matière terreuse.

S'il faisait un temps humide, le sable ne crissait pas fort. Alors, on le lançait sur un tissu blanc et, lorsqu'on secouait celui-ci, il ne devait laisser aucune trace, aucune tache. Plus ce sable contenait de silts et de poussières de silice, plus le mortier était puissant. L'expérience dictait de laisser reposer les sables fossiles durant quelques semaines. Faute de quoi, mêlés à la chaux et à la paille, ils faisaient un mortier qui gerçait et les murs ne pouvaient soutenir un grand poids.

Si l'on veut faire des crépis, on préférera un sable de rivière. Celui-ci permettra des plafonds très solides, et ce d'autant plus qu'il n'aura pas reposé longtemps, exposé aux pluies, après son extraction des carrières : il faut qu'il reste riche en sels minéraux.

Les briques

Une brique a des proportions constantes, des côtés parallèles, des arêtes droites ; son corps est ferme, solide, léger et poreux, mais il s'oppose à l'eau liquide. Elle doit être faite d'une terre très grasse, mais très fine, semblable à une craie ou au limon d'un lac de haute montagne. On choisit les briques qui ont été moulées au printemps ou à l'automne : celles qui ont été moulées en été gercent au séchage et fissurent en profondeur, celles qui auraient connu le gel durant leur premier séchage seraient tout à fait impropres à la construction. Les meilleures briques ont au moins deux années de fabrication. Les briques qui n'ont pas séché suffisamment longtemps se rétracteront plus tard et… les enduits risquent de tomber inopinément. Vitruve disait que, dans les bâtiments nobles, on choisissait des briques qui avaient séché au moins cinq ans.

La chaux

La chaux aérienne réagit au CO_2 de l'air (carbonatation), tandis que la chaux hydraulique durcit en séchant. La chaux résulte de la calcination du calcaire très pur (chaux vive) et est généralement éteinte ensuite avec de l'eau (chaux aérienne). La chaux hydraulique provient de la calcination de calcaires argileux, elle contient des ajouts de silicates, aluminates ou ciment. Il existe aussi une chaux dolomitique (DL), résultant de la calcination de coquillages.

La chaux aérienne est nommée CL (pour « Calcic Lime »), suivi de deux chiffres : le nombre suivant CL (70, 80 ou 90) indique le pourcentage de CaO. Plus celui-ci est grand, plus la chaux est grasse.

La chaux hydraulique est nommée NHL (pour « Natural Hydraulic Lime »), suivi d'un chiffre (2, 3,5 ou 5). Plus ce dernier est grand, plus la prise de la chaux hydraulique est rapide.

Recyclable

La chaux utilisée par nos anciens était de la chaux aérienne. C'est le matériau le plus durable qui soit : gardée humide, il suffit de la mélanger à nouveau pour pouvoir l'utiliser ; si elle a séché, il suffit de la calciner à nouveau pour recréer de la chaux vive. En effet, lorsque l'on calcine des pierres à

Copyright © 2016 Eyrolles.

chaux ($CaCO_3$) à 900 °C, du CO_2 est évacué sous forme de fumée. On obtient de la chaux vive (CaO). On l'éteint avec de l'eau pour obtenir de la chaux aérienne ($Ca(OH)_2$). La prise de la chaux aérienne s'effectuera en fixant du CO_2 de l'air ($Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_2 + H_2O$. Lorsque la chaux aura séché, il ne restera que du $CaCO_3$. Autrement dit, la chaux qui a parfaitement carbonaté est redevenue une pierre à chaux. Aussi n'y a-t-il pas de déchets de chaux sur un chantier. Si une maison devait être détruite, on en réutilisait les pierres et les morceaux de chaux étaient transportés chez un chaufournier qui en refaisait de la chaux aérienne.

Carbonatation

La chaux hydraulique sèche vite, son emploi est donc rapide, ce qui facilite la construction. La chaux aérienne, par contre, nécessite un séchage long et à l'humidité. C'est-à-dire que la surface, d'une paroi qui vient d'être édifiée avec un béton de chaux aérienne, doit toujours rester plus humide que l'intérieur de la paroi : il faut que la carbonatation (l'apport de CO_2) commence au cœur de la paroi (et se développe du cœur vers l'extérieur) si l'on souhaite qu'elle soit parfaite et donc que la paroi soit la plus solide possible. Ce qui, pour une paroi épaisse, nécessite de maintenir sa surface constamment humide durant des semaines, voire des mois. On peut édifier une paroi en plusieurs mois du moment que la surface inférieure n'a pas carbonaté et est restée humide : on place toujours le mortier de chaux « humide sur humide ».

À noter

Les chantiers de la majorité des cathédrales ont dû s'arrêter durant des dizaines d'années, pour cause de guerre ou de manque de fonds.
À la fin des travaux, les ouvriers avaient recouvert les parois à base de chaux d'une toile humide, puis d'une grande quantité de sable. Ainsi, la surface de la chaux était restée perpétuellement humide. Lorsque le chantier reprenait, on enlevait le sable et les toiles, et on pouvait continuer à édifier sur le mur à la chaux, sans qu'il perde de sa force.

Mortier

On peut utiliser la chaux aérienne comme liant d'un sable ou de pierres sous diverses formes. Le mortier ne contient que du sable, tandis que le béton est employé avec des petites pierres. Un mortier de béton a une faible résistance mécanique. En tant que « colle » des matériaux, il est beaucoup moins efficace qu'un ciment. Par contre, il maintient parfaitement des pierres en place. D'où le fait que les constructions anciennes fonctionnent selon des principes de statique et d'écrasement : il n'y a pas de porte-à-faux.

Dans un béton de chaux, les graviers sont maintenus en place par la chaux, mais, de fait, ce sont eux qui supportent le poids. De même, dans une structure en colombage, ce sont les pièces de bois qui supportent l'écrasement et le mortier de chaux qui les maintient (et les empêche de fléchir). Les Romains comme les mestres se servaient surtout de la chaux pour maintenir des pierres (ce qui leur évitait la taille et le transport très onéreux de pierres taillées). Ces murs de chaux et de pierres (ex calce et caementis) furent appelés opus caementicum, ce qui, plus tard donnera le mot « ciment ».

Mélange

La chaux est tierce. Ce qui signifie qu'en tout cas, le mélange est composé d'un volume de chaux pour trois volumes de sable tamisé. Le volume d'eau est moins précis (puisqu'il est régulé par le temps de séchage d'un mortier de chaux à la surface auquel on ajoute constamment des molécules d'eau), les textes nous précisent cependant que l'aspect final du mortier de chaux qui vient d'être mélangé a la consistance d'une bouse de vache. Ce qui a permis

Copyright © 2016 Eyrolles.

l'usage d'épithètes parfois drôles dans certains textes : les maçons qui construisaient des voûtes dans les cathédrales insistaient pour que la bouse soit celle d'une vache constipée, ceux qui préparaient des surfaces à enduire préféraient qu'elle ait mangé du trèfle mouillé…

Préparation

Puisque nos moteurs actuels n'existaient pas, le mélange idoine de chaux + sable + eau était obtenu par des artisans spécialisés en l'écrasant, puis en le retournant avant de l'écraser à nouveau. Pour ce faire, ils se servaient d'un outil constitué d'un manche de bois et d'une pièce à base de plomb plus ou moins ovale, dont une face avait été vaguement creusée. Ils n'utilisaient pas de pelle : il ne s'agissait pas de mélanger une colle liquide avec du sable, mais de réaliser une imbrication intime des matériaux. Si le mortier était destiné à une partie qui devait être particulièrement solide, il devait être écrasé pendant plus longtemps. Pour les fondations d'un château fort, par exemple, on exigeait sur les commandes que « la chaux » ait été travaillée durant une semaine au moins. On a effectivement relevé que le nombre et la dimension des bulles d'air contenues dans le béton de chaux des arènes de Béziers représentaient un volume d'air emprisonné quatre-vingts fois moindre que celui des meilleurs mélanges de ciment utilisés pour des rénovations récentes.

Matériel

Malheureusement, des mélangeurs dont les pales (entraînées par l'axe central) tournent dans le sens opposé de celui de la cuve ne sont disponibles que pour de très grandes quantités et sont réservés à l'industrie. Les autoconstructeurs pourront utiliser de vieux pétrins de boulanger, qui offrent cette caractéristique et permettent d'écraser le mélange. Sinon, il reste la bétonnière… à condition qu'elle soit peu remplie, qu'elle tourne longtemps (plus d'une heure par gâchée), à la vitesse la plus lente possible, le plus horizontalement possible de façon à ce que le mélange tombe et s'écrase le plus souvent possible dans la bétonnière. C'est la chute répétée du mélange au sein de la bétonnière qui assurera l'écrasement nécessaire (malheureusement, de manière bien imparfaite). Notez que le mortier de chaux est très corrosif (basique), il attaque les métaux mais aussi la peau : celui qui prépare le mortier doit impérativement porter des manches longues, des gants et des lunettes (s'il venait à l'oublier, la morsure de la chaux le lui rappellerait).

Pouzzolane

Le béton de chaux gagne à contenir une pouzzolane, mais pas n'importe laquelle. Il s'agit d'une pierre volcanique qui a la particularité de faire un très bon catalyseur de la chaux. Vitruve précise que, des deux mines de pouzzolane de la région napolitaine, la rouge n'est pas bonne et qu'il faut choisir la grise ; il dit aussi qu'il n'y en a pas en Grèce.

Pourquoi ? Parce que la pouzzolane, qui permet de laisser passer la vapeur d'eau et le CO_2 mais pas l'eau liquide, est une « zéolite » qui abrite en son sein de minuscules canaux d'un diamètre très particulier. Les Mayas utilisaient aussi de la pouzzolane pour leur chaux, et la meilleure provenait de la banlieue de la ville d'Oaxaca. Parmi les zéolites, celle qui est la mieux adaptée à la carbonatation de la chaux et qui est disponible en France est (étonnamment) surtout utilisée pour les litières pour chat et pour les filtres de piscine, elle est importée de Turquie : la clinoptilolite.

Vapeur d'eau

Le mortier de chaux est presque étanche à l'eau, mais parfaitement perméable à la vapeur d'eau. Il sèche de manière homogène, c'est-à-dire qu'à tout moment, la densité de vapeur d'eau au sein de la paroi tendra à être identique en tout point. Pour rendre un mortier de chaux complètement

Copyright © 2016 Eyrolles.

étanche, il fallait le piler avec des briques pilées, mais pas n'importe quelles tuiles : celles des côtés du four qui n'avaient pas été assez cuites (et qu'on ne pouvait vendre pour les toits). Les tuiles actuelles ont subi une cuisson forte et brutale et ne permettent pas de rendre le mortier de chaux étanche. Il faut donc recourir à l'étanchéité des enduits. (Nous ne traiterons pas ici de l'usage de la chaux dans les enduits. Cela a été fait dans d'excellents ouvrages, en particulier celui de l'École d'Avignon, chez le même éditeur.)

Le bois

La connaissance par les mestres des diverses variétés de bois et de leurs applications dépasse très largement la compréhension que nous en avons aujourd'hui. Nos paysans en ont gardé quelques souvenirs : ils utilisent le bois de robinier (faux acacia) pour les piquets de vigne (après en avoir passé la pointe au feu), ils apprécient les bois serrés des fruitiers pour leurs meubles et connaissent la résistance du bois de châtaignier ou l'imputrescibilité du mélèze. La chaux régule l'humidité, comme le bois, mais elle ne se rétracte pas en séchant. Aussi, un bois trop peu séché risque de perdre un peu de son adhérence à l'intérieur d'une paroi de chaux. À cette limite près, on a utilisé la force et la résistance du bois dans la chaux pendant des millénaires, comme dernièrement on a utilisé la résistance à la traction du fer à béton dans les mélanges à base de ciment.

La coupe

La majorité du bois de Provence descendait la Durance en radeaux flottants depuis les Alpes, une autre part venait par le Rhône. Les mestres avaient donc peu de contrôle sur la coupe, ils savaient néanmoins comment elle aurait dû se faire. Pour la construction de châteaux, ils envoyaient l'un des leurs choisir le bois sur pied et contrôler le travail des bûcherons. Pour les poutres des grandes salles, apparentes, il leur fallait un bois qui ne fende pas, ils exigeaient que les branches fussent coupées à ras et le fût soit écorcé au printemps, plus d'un an avant l'abattage de l'arbre. Pour les poutres des parties basses, ils souhaitaient qu'une partie de l'aubier devienne bois et résiste donc aux insectes, il fallait donc ôter le maximum de sève à cette partie du tronc : ils demandaient aux bûcherons de réaliser une coupe à la scie du tronc jusqu'à la moitié du cœur de l'arbre, au printemps, pour une coupe de l'arbre au moins dix-huit mois plus tard (ce qu'on appelait « cerner » un arbre). Pour ce genre de commandes, ils choisissaient des arbres poussant en altitude et exclusivement sur des flancs sud, idéalement ceux qui étaient isolés ou en lisière basse de ces massifs forestiers.

Mais en général ils construisaient des bâtiments plus simples et considéraient qu'un tronc ne pouvait être coupé qu'à la lune descendante (idéalement dans la semaine qui suit la pleine lune) et exclusivement dans la période propice : les chênes en été ; les sapins, pins et épicéas dès qu'ils ont poussé leurs premiers « jetons » ; le tilleul, l'érable, l'orme ou le frêne juste après les vendanges ; les autres essences devant être coupées entre le commencement de l'automne et la Noël (les troncs qui avaient été abattus entre Noël et le printemps restant acceptables pour être noyés dans la chaux ou pour de plus faibles portances horizontales).

On n'employait pas non plus n'importe quel bois pour n'importe quoi : l'orme et le frêne pour les assemblages tenon-mortaise, s'ils avaient été séchés plus de dix ans (à l'ombre) ou s'ils avaient été cernés sur pied ; le charme, qui plie aisément sans se rompre, pour les jougs des animaux et certains outils ; le cyprès et le pin, qui se courbent aisément, étaient considérés comme inadéquats pour la construction mais bons pour les planches parce qu'ils résistent aux insectes et durent longtemps ; le larix, si rare, qui est pratiquement incombustible, était réservé à la construction des

Copyright © 2016 Eyrolles.

cheminées ; le coudrier pour les manches d'outils ; le peuplier blanc ou noir, le saule et le tilleul faisaient d'excellents bois de sculpture mais ne pouvaient porter que peu de poids ; le hêtre devait être protégé de toute eau stagnante qui le ferait pourrir sans répit ; le chêne, si fort, craint les brusques chutes d'humidité dues au mistral, il doit rester dans un environnement humide (couvert de chaux) sous peine de flamber et de fendre ; l'aune et le saule, qui ont si peu d'utilité en construction, s'avèrent excellents s'ils restent perpétuellement au contact de l'eau et font d'excellents pilotis ; cèdre, genévrier et cyprès ont une résine odorante qui les protège des vers... En règle générale, les mestres suivaient un certain nombre de préceptes :

- L'aubier, qui, sous l'écorce, entoure le bois (puis le cœur), était rejeté en Provence, parce que trop sensible aux insectes xylophages.
- Les arbres qui croissent le plus lentement ont le bois le plus dur.
- À l'inverse des autres arbres, plus un sapin est jeune, plus son bois est fort. Adulte, ce sont ses départs de branches et sa cime qui ont le plus de puissance (par rapport à son diamètre). Un sapin qui pousse dans un lieu bien aéré a un bois considérablement plus fort que s'il pousse à l'ombre, en forêt.
- De deux pièces de bois de même grosseur et de même longueur, la plus lourde est la plus forte.
- Lorsque le bois rompt, c'est à la longue. Aussi ne faut-il pas donner au bois plus que la moitié de la charge qu'il pourrait porter.
- Le bois de sapin n'a de force que dans son axe vertical, il craint le feu et les termites.
- L'extrémité d'une poutre qui fait saillie sur une façade doit être protégée, ou bien on y trace au ciseau des traits verticaux (du haut vers le bas) pour que l'eau s'y écoule et ne pénètre pas le bois. Sinon, la poutre fendra et sera attaquée par les insectes. Si cette extrémité de poutre donne vers le vent dominant, il faut en plus la couvrir de cire.
- Pour que le bois d'un arbuste ne soit pas attaqué par les insectes, on le perce par le bas en de multiples endroits au printemps, puis on le coupera à l'automne (au-dessus des trous de perçage).
- Un coudrier (noisetier) coupé à la hache repoussera ; coupé à la scie, il est condamné.
- On ne coupe jamais un fruitier qui porte des fruits.
- On ne coupe jamais un bois plein de sève.

Mélanger en écrasant

On trouve dans les brocantes et certaines vieilles fermes des meubles en bois, relativement longs et dont l'ouverture par le haut est couverte, sur toute sa longueur, d'une pièce de bois chevillé. Ces pétrins sont utilisés par les décorateurs comme coffres sur pieds et comme crédences. Pour un boulanger d'aujourd'hui, un pétrin est une machine qui lui sert à mélanger la pâte à pain, il considère que ce meuble pourrait tout au plus être assimilé à une chambre de pousse, c'est-à-dire à un endroit fermé où la pâte pourrait gonfler tranquillement à l'abri des courants d'air. Jusqu'au XIX^{e} siècle, ces meubles servaient à protéger la « pousse » de la pâte à pain, mais aussi à pétrir. Une fois le mélange farine + eau + levure + sel réalisé, on le laissait reposer et gonfler un peu. Puis on écrasait la pâte et on la rassemblait sur un côté, à l'intérieur du pétrin, on en coupait un morceau de la taille d'un poing que l'on projetait avec force de l'autre côté du pétrin, puis un morceau encore... jusqu'à ce que toute la pâte se trouvât de l'autre côté du pétrin. Et on recommençait ainsi sept fois la même manœuvre, en coupant et en projetant la pâte d'un côté à l'autre du pétrin. On estimait alors que la pâte était mélangée ; on la roulait en boule et on la laissait gonfler ; on refermait le couvercle. Autrement dit, le boulanger n'a pas reconnu un pétrin parce qu'il a oublié qu'à l'époque, des communautés faisaient leur pain à base d'huile de coude et de courbatures, à la seule force de leurs épaules et de leurs bras. Ce meuble servait à la fois de « pétrin » et de « chambre de pousse ».

Copyright © 2016 Eyrolles.

9| Économiser l'énergie

L'air qui s'échappe d'un logis emporte des calories avec lui. Lorsqu'il n'existait pas d'isolant pour les murs ni de joints pour les fenêtres, on créait des pièces moins tempérées que le foyer qui étaient chauffées par toutes ces fuites à travers les parois latérales. Dans nos modes constructifs actuels, les parois latérales sont isolées et les joints de fenêtre remarquablement isolants mais les matériaux utilisés multiplient la puissance des ponts thermiques. On pourrait faire de même aujourd'hui et préchauffer un garage, une buanderie ou une pièce qui n'est utilisée que l'été… avec les pertes de l'habitation principale.

SOLUTION BIOCLIMATIQUE 9. PONTS THERMIQUES

Sur la paroi d'une maison, une caméra thermique colore trois types de fuites thermiques. Les déperditions surfaciques sont directement liées à la résistance thermique des constituants de ladite paroi. Les fenêtres, généralement moins isolantes que les murs, le montrent en arborant une couleur plus jaune que la façade.

Sur les bâtiments mal isolés, l'infrarouge révèle immédiatement de grands traits colorés sur la façade. Ils correspondent aux angles des murs ainsi qu'aux dalles de plancher et aux refends. Ce sont les ponts thermiques linéiques. Des points rouges ou jaunes apparaissent partout où l'isolant est traversé par un élément (métallique). Ce sont les ponts thermiques ponctuels. Les ponts thermiques entraînent des déperditions supplémentaires qui, pour certains bâtiments, peuvent dépasser 40 % des déperditions thermiques totales à travers l'enveloppe.

Du point de vue bioclimatique, plusieurs solutions ont été proposées par nos anciens. Elles étaient la conséquence directe du climat local. Toutes ne sont pas transposables en Provence.

1. Le pont thermique linéique de la dalle de plancher

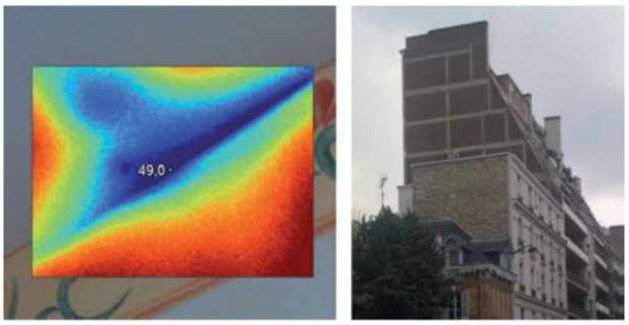
Les ponts thermiques linéiques, du fait de leurs dimensions, représentent généralement des pertes considérables. Ils apparaissent à la caméra thermique parce qu'il y a plus d'énergie qui traverse le mur et l'isolant à cet endroit. Il s'agit, finalement, d'une importante masse intérieure (plancher ou mur de refend) qui concentre l'énergie qu'elle a captée et la transmet par ses bords à l'enveloppe du bâtiment. C'est donc un transfert thermique par conduction. Cette accumulation de thermies dans les plus grandes masses

Copyright © 2016 Eyrolles.

thermiques du bâtiment est d'autant plus importante si elle ne peut se déverser dans les parois mais seulement dans les masses thermiques transversales. Les ponts thermiques dus aux dalles ou aux murs de refend rejettent donc beaucoup plus d'énergie en cas d'isolation thermique par l'intérieur (ITI).

Les mestres provençaux édifiaient lourd ! Puisque le climat leur imposait d'utiliser l'inertie dans le bâtiment et qu'ils ne disposaient pas d'isolants qui auraient permis une isolation par l'extérieur, ils construisirent des ponts thermiques... mais qu'ils utilisèrent. Dans tous les mas de Provence, de gigantesques ponts thermiques linéiques chauffent l'extérieur des pièces à vivre, c'est-à-dire d'autres pièces : les pièces tampons.

Ils édifiaient la pièce principale, dans laquelle toute la maisonnée se repliait en hiver. Autour, au gré des bonnes récoltes et du temps nécessaire à l'accumulation des pierres, ils construisaient trois bâtiments annexes. D'abord, au nord, le cellier : pour se protéger du mistral. Ensuite, la grange-remise à l'ouest : pour se protéger du soleil des après-midi d'été. Enfin, une étable à l'est. Au sud, ils ne construisaient rien : ils faisaient tout leur possible pour que rien ne vienne masquer la façade de la pièce principale aux rayons solaires d'hiver.



Ponts thermiques linéiques. Le pont thermique le plus puissant est généralement celui créé à la jonction entre la dalle de plancher et le mur extérieur, surtout en cas d'isolation par l'intérieur. Dans l'exemple de gauche, la caméra thermique montre que, derrière le Placoplatre du plafond, les bandes de laine de verre n'arrivent pas tout à fait jusqu'au mur (49 °F = 9,5 °C). Dans l'exemple de droite, les dalles de plancher sont apparentes sur la façade.

Les bâtisseurs chinois

Les bâtisseurs chinois ne construisaient pas de maisons au sens où on l'entend en Occident : ils livraient « des toits sur piliers de bois ». Seule l'arrivée d'eau courante était tracée. C'est l'acheteur qui individualisait sa maison. Il en construisait les parois en terre ou en pierre, mais elles n'étaient pas portantes. Il n'y avait aucune dalle solidaire des parois extérieures, aucun mur de refend supportant plus qu'un plancher. Les ponts thermiques linéiques structurels étaient pratiquement inexistants. Par ailleurs, l'enveloppe de terre, armée de bois ou non, était protégée par la grande avancée des toits. Les parois mesuraient 50 à 80 cm d'épaisseur selon les régions : elles isolaient tout en gérant l'humidité.

En hiver, seule la pièce principale était chauffée par le feu de l'âtre. La dalle de plancher recevait l'air chaud qui s'élevait au plafond. Elle transmettait une bonne part de cette énergie jusqu'à ses bords : les ponts thermiques chauffaient les pièces ouest, nord et est. Au sud, l'irradiation des hivers ensoleillés apportait souvent plus d'énergie au pont thermique qu'il n'en relâchait (sauf exceptions : bâtiments en altitude, vallées humides).

Les « chambres » faisaient office d'espaces tampons au-dessus de la pièce principale et ce d'autant plus qu'elles étaient isolées au plafond par le grain conservé au sec durant l'hiver (« le grenier »). Toutes ces pièces annexes, qui isolaient la pièce principale de l'air extérieur, se trouvaient préchauffées par les animaux et les ponts thermiques. In fine, l'enveloppe de la pièce principale devenait, pour les faces ouest, nord et est : un mur de pierre de 60 cm d'épaisseur + quelques mètres d'air réchauffé + un mur de pierre de 60 cm d'épaisseur.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Dans la formule « D = U x S x ΔT », le ΔT représente la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur d'une paroi, donc, pour ce qui concerne la pièce principale, la différence de température entre celle régnant dans le foyer et celle de la pièce tampon (préchauffée) voisine.

2. Les ponts thermiques ponctuels

Les ponts thermiques ponctuels résultent souvent de rajouts : ce sont les plus simples à éviter.

• Chaque bricoleur du dimanche utilise clous et vis. Ceux-ci sont constitués de métal et souvent d'acier. La conductivité thermique de l'acier doux, à 20 °C, est de 48. L'acier doux conduit 1 200 fois plus de chaleur que les isolants de base (λ = 0,04). Ce qui revient à dire qu'un petit clou de 5 mm^2 de section, qui traverse l'isolant, annule l'efficacité de l'isolation sur 60 cm^2 de paroi. Les personnes qui ont privilégié une isolation par l'intérieur devraient en prendre conscience. Chaque tableau qu'ils ont accroché, chaque meuble fixé au mur... sont autant de ponts thermiques ponctuels. Il suffit d'additionner la section de toutes les vis et de tous les clous du logement qui prennent appui dans le mur pour mesurer le cumul des ponts thermiques ponctuels générés.

• À l'extérieur, le même bricoleur fixera lui-même sa tonnelle. Il s'agit d'une armature métallique, souvent peinte en noir, destinée à recevoir une plante grimpante qui fera un ombrage bienfaisant sur la terrasse. Étant donné son matériau et sa couleur, tant que la verdure ne la couvre pas intégralement, la structure va chauffer au soleil. D'un côté, elle est fixée au sol ; de l'autre, elle s'appuie sur la maison. Le plus souvent, notre bricoleur empoigne sa perceuse, attaque le mur, fait des trous au bon diamètre, y glisse des chevilles et visse. Un homme plus averti emploierait une perforeuse, c'est-à-dire un appareil doté d'une mèche qui vide le trou de ses poussières à mesure qu'il le perce. Il placerait ensuite une rondelle isolante (liège, plastique) entre le mur et l'armature métallique et une autre, plus petite, sous la tête de la vis. Éventuellement, il laisserait aussi un point de silicone pour éviter que l'humidité ne s'introduise derrière l'enduit par chaque trou. Le bricoleur du dimanche aura créé des ponts thermiques ponctuels environ cent fois plus puissants que l'homme averti. Ces vingt-neuf ponts thermiques ponctuels, sur 6 m^2, correspondent à l'annulation de plus de 10 m^2 d'isolation. Dans ce cas de figure, il vaut mieux isoler par l'intérieur.

Les ponts thermiques ponctuels résultent souvent de rajouts : ce sont les plus simples à éviter.

• Le plus souvent, on confie à son architecte le soin de concevoir sa maison, mais on ne lui demande pas de s'occuper de son environnement. Une fois la demeure habitée, l'habitant se rend vite compte

Copyright © 2016 Eyrolles.

qu'il lui manque un robinet dans son jardin. Il n'attend pas longtemps : il perce un mur devant la cuisine ou la salle de bains et y implante un tuyau de cuivre. Il se trouve que le cuivre laisse passer dix mille fois plus la chaleur qu'un isolant standard. Ce tuyau va régulièrement être empli d'une eau qui s'écoulera de l'intérieur vers l'extérieur, entraînant ainsi encore quelques millions de calories par minute au travers de la paroi isolée.

3. Pont thermique linéique non structurel

Un architecte concerné a demandé à un bureau d'études de lui calculer l'impact thermique qu'aurait sur une maison qu'il rénovait (isolation par l'extérieur) le fait de masquer une gouttière en la glissant dans l'épaisseur de l'isolant ou bien de la laisser apparente à l'extérieur dudit isolant. Le résultat fut sans appel : 4 °C ! Par hypothèse, on avait pourtant considéré que la descente d'eaux pluviales ne contiendrait jamais d'eau (c'était plus simple à calculer). La gouttière se trouvait

Cette portion de mur (Aix-en-Provence) accumule les ponts thermiques ponctuels. Certains traversent toute l'enveloppe (ceux qui véhiculent de l'électricité). Ces 29 ponts thermiques ponctuels, sur 6 m², correspondent à l'annulation de plus de 10 m² d'isolation. Dans ce cas de figure, il vaut mieux isoler par l'intérieur.

Rails métalliques en façade destinés à supporter des panneaux de 10 cm de laine de verre. La conductivité thermique de l'aluminium est 5 600 fois plus importante que celle de la laine de verre.

Tiges en aluminium traversant l'isolant dans un faux plafond sous rampant.

Génoises dans le ciment

En Provence, les génoises constituent le pont thermique le plus apparent. Lorsque les murs étaient édifiés à la chaux, les génoises permettaient d'utiliser le mistral pour assécher les parois. Ces belles rangées de tuiles en haut des murs ont séduit les marchands de tourisme. De nombreux règlements d'urbanisme locaux suggèrent (voire imposent) l'usage de génoises.

Or nous savons que le ciment ne se comporte pas comme la chaux vis-à-vis de l'humidité : les tuiles de terre cuite des génoises n'assécheront jamais un mur de béton. Aussi, concevoir une génoise sur une paroi cimentée revient à lui imposer un énorme pont thermique linéique. La fuite d'énergie sera telle qu'aucune bâtisse en béton de ciment ne pourra jamais atteindre les standards du passif si ses égouts de toits sont ornés de génoises !

Copyright © 2016 Eyrolles.

à proximité de l'angle de la paroi. Si on la substituait à l'isolant sur toute sa hauteur, lorsque la température extérieure atteignait 0 °C, la température intérieure du mur, le long du coin vertical, se trouvait 4 °C plus basse que celle des autres surfaces intérieures des parois de la maison. Le résultat était suffisamment éloquent pour que le propriétaire revienne sur son idée de camoufler sa gouttière. Le bureau d'études n'eut même pas à calculer les ponts thermiques ponctuels dus aux vis qui, via les colliers, auraient fixé les gouttières à la paroi. L'absence de prise de conscience des ponts thermiques a été flagrante jusqu'aux années 2000. On voit encore beaucoup d'isolants (dont l'achat est justifié par le confort thermique) maintenus par un appareillage métallique. Ainsi, les laines minérales apposées en façade, en cas d'isolation par l'extérieur, sont très souvent maintenues par des rails en aluminium, qui forment autant de ponts thermiques linéiques. Ces rails sont à leur tour vissés sur les parois métalliques des entrepôts, lesquelles sont boulonnées à l'ossature métallique. L'isolation en façade par pose de 10 cm d'épaisseur de laine de verre sur rails d'aluminium aboutit à une isolation effective qui dépasse rarement 25 % du pouvoir isolant de la laine de verre. En d'autres termes, l'isolation apportée aura perdu environ 75 % de son efficacité par les ponts thermiques linéiques dus aux rails en aluminium. Il en résulte un complexe isolant dont l'efficacité thermique serait à peu près équivalente à celle d'une simple bâche collée par plots sur toute la façade.

SOLUTION BIOCLIMATIQUE 10. PIÈCES TAMPONS

Lorsqu'un mestre concevait une maison, il entourait la pièce principale de pièces tampons. Chacun de ces volumes d'air réchauffé avait une fonction différente, aucun n'était dédié au repos. On allait dans les pièces à l'ouest, au nord et à l'est pour y effectuer une tâche précise. Puisqu'on y restait en mouvement, on trouvait supportable une température de 5 °C inférieure à celle de la pièce principale. Dans les chambres, au-dessus de la dalle, on allait dormir. Une robe de nuit et un bonnet permettaient de supporter sans problème une température de 2 à 3 °C plus basse que dans la pièce à vivre.

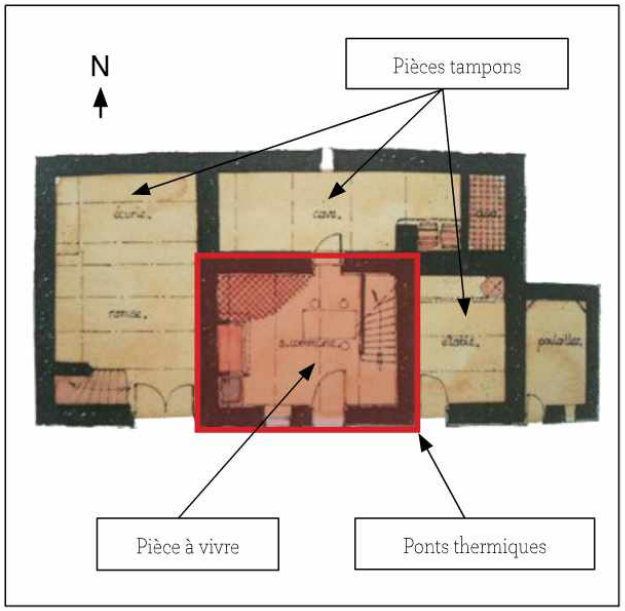
Effectivement, la dalle réchauffait plus par sa surface supérieure (non isolée) que par ses ponts thermiques latéraux.

La pièce à vivre se trouvait donc entourée d'un cellier (au nord), d'une grange (à l'ouest) et éventuellement d'un auvent, d'une étable (à l'est) et parfois d'un poulailler, de chambres au-dessus (elles-mêmes protégées par le grenier) et rarement d'une cave (en dessous). Toutes ces pièces étaient vaguement chauffées par les flux thermiques qui s'échappaient de la pièce principale.

A contrario, le besoin de chauffage, en hiver, en était limité d'autant, puisque les murs ouest, nord et est donnaient sur des espaces préchauffés, sensiblement moins froids que l'air extérieur. En été, les grange, cellier et étable, à l'ombre de leur toit, restaient plus frais que l'air ambiant, contribuant d'autant à éviter toute canicule à la pièce principale. Hormis la face sud, les atmosphères relativement tempérées des pièces tampons contribuaient au confort thermique du logis.

C'est l'objet des pièces tampons. Dans nos maisons modernes, le concepteur de l'habitat placera au mieux ces pièces que l'on utilise mais où l'on ne vit pas. Il peut s'agir de simples volumes, du moment qu'ils mesurent plus de 4 cm d'épaisseur, ou de vraies pièces dans lesquelles on se rend

Copyright © 2016 Eyrolles.



Dans nos bâtiments modernes, le concepteur de l'habitat placera au mieux ces pièces que l'on utilise mais où l'on ne vit pas. Il peut s'agir de simples volumes du moment qu'ils mesurent plus de 4 cm d'épaisseur, ou de vrais pièces dans lesquelles on se rend épisodiquement et généralement en mouvement (donc on y accepte une température plus basse) : cage d'escalier, garage, hangar, sas, cellier, buanderie, débarras, penderie, placard, local à buches ou à pellets... Les chambres d'amis que l'on n'utilise que l'été font aussi de parfaits espaces tampons.

épisodiquement et généralement en mouvement (donc on y supporte une température plus basse) : cage d'escalier, garage, hangar, sas, cellier, buanderie, débarras, penderie, placard, local à bûches ou à pellets... Les chambres d'amis dont on ne se sert que l'été font aussi de parfaits espaces tampons.

1. Serre

Au nord du 45e parallèle, on n'envisage pas de maison passive sans prendre en compte l'apport de chaleur à travers les ouvrants de la paroi sud. Le système construit qui comporte le maximum de surface vitrée étant la serre, celle-ci est largement employée au-delà du 55e parallèle. En deçà, on peut se contenter de larges baies vitrées orientées au midi et bien dimensionnées. En dessous du 45e parallèle (Provence), une serre destinée au chauffage d'une habitation ne comporte plus de surface vitrée horizontale. Elle ressemble à une véranda : une surface verticale où le verre est prépondérant.

Du fait de leur partie horizontale, les serres des pays du Nord connaissent deux problèmes récurrents qui ne concernent pas les vérandas : des surchauffes d'été et des problèmes d'étanchéité (souvent dus aux courbes de dilatation différentes du verre et du métal utilisé pour les huisseries).

Le verre s'échauffe

L'énergie est apportée par les rayons solaires. Une part de ceux-ci va se réverbérer sur les vitres (de plus en plus à mesure que l'on s'approche de 70°), mais l'essentiel va les traverser. En passant, les rayons vont légèrement échauffer le verre (puisqu'il n'est pas transparent à 100 %). Le verre étant un solide, il va transmettre cette chaleur jusqu'à ce que l'ensemble du vitrage se trouve à une température homogène. Donc, en traversant le verre, les photons lui confient une énergie qui va (très) légèrement réchauffer l'intérieur de la serre, par irradiation. Chaque vitre se comporte alors comme un pont thermique surfacique qui laisse passer un flux d'énergie de sa face chaude vers sa face froide. Ce pont thermique tend à égaliser les températures de toutes ses faces : il va pomper

Sas thermique

Les maisons passives méditerranéennes promues par le PassivHaus Institut comprennent toujours un sas d'entrée. Celui-ci fonctionne comme un espace tampon tant que personne ne le traverse.
Il doit mesurer environ trois mètres de long si l'on veut se déplacer facilement entre les portes asservies. Celles-ci ne pouvant être ouvertes en même temps, on évite des pertes de chaleur importantes lors des entrées/sorties des habitants du logis.

Copyright © 2016 Eyrolles.

de l'énergie à l'intérieur et la relâcher à l'extérieur chaque fois qu'il fera plus chaud à l'intérieur qu'à l'extérieur. La partie externe de cette vitre étant confrontée aux déplacements d'air (vent, courants d'air, remous), si un souffle frais balaye la vitre, il va en absorber des calories par convection.

L'effet de serre

Après avoir traversé la vitre, les rayons solaires se diffusent dans une pièce (la serre) par rayonnement direct ou par réflexion. Ils vont apporter des calories à l'air ambiant. Ils vont surtout échauffer tous les matériaux lourds. En absorbant les photons, les matériaux vont se charger en énergie, celle-ci va exciter les couches superficielles des atomes et des molécules. Le matériau lourd va transmettre de la chaleur (conduction) par toutes ses surfaces en contact avec d'autres solides et va irradier le solde. Cette irradiation se produit dans les rayons infrarouges de grande onde. Or le verre est étanche à ces derniers. Ils vont donc se réverbérer indéfiniment à l'intérieur du volume de la serre, lâchant à chaque fois un peu d'énergie. C'est un effet de serre.

La serre permet de bénéficier pratiquement de l'intégralité de l'énergie apportée par les photons qui ont traversé son vitrage.

À noter

Il y a une pièce tampon qui surpasse toutes les autres : la serre. Jusqu'à Louis XIV, jusqu'à ce que dans le village de Saint-Gobain on découvre le verre laminé, il n'y avait pas de serres. Les meilleurs capteurs de la chaleur solaire étaient les orangeries. Une serre génère beaucoup plus de chaleur qu'une orangerie : le rapport entre la surface de verre et celle occupée par les huisseries y est très supérieur, puisque les vitres sont nettement plus grandes.

Argon

L'air immobile est un bon isolant, l'argon est encore meilleur (de 15 à 20 %). On considère que le gaz, dans un double vitrage, est immobile si l'écartement entre les deux parois vitrées est inférieur à 18 mm (au-delà, un mouvement de convection se forme entre les vitres). Dans les zones ventées de Provence, le double vitrage argon offre l'avantage de réduire les pertes par convection à la surface extérieure des serres, pour un surcoût raisonnable (moins de 5 %).

Si une maison donne sur une serre fermée, il suffit d'ouvrir une fenêtre pour réchauffer instantanément l'air intérieur du logement. De plus, en construisant des surfaces maçonnées dans la serre (banc, marche, étagère) liées avec le bâti de la maison, on crée autant de ponts thermiques qui permettent de véhiculer la chaleur de la serre vers l'habitat.

Serre ou auvent

Une serre adaptée au climat local est donc un volume qui a la particularité d'être chaud en hiver et frais en été. Or la serre s'échauffe chaque fois qu'un rayon de soleil y entre ! En été, on pourrait y connaître des surchauffes. Les horticulteurs le savent bien. Pourtant, ils considèrent leur serre comme un espace tempéré : l'hiver, il y fait nettement plus chaud qu'à l'extérieur et il y fait plus frais aux beaux jours. La différence entre une serre et un auvent, c'est que la serre est fermée. L'auvent peut couvrir le même volume, mais, comme son nom l'indique, le vent le traverse. En été, les jardiniers du dimanche couvrent leur serre d'une toile, mais surtout ils ouvrent les ventilations. Les horticulteurs, eux, confient l'ouverture de leurs centaines de mètres carrés de fenêtres à des minuteurs, voire à des ordinateurs. Lorsqu'il est besoin, ceux-ci déclenchent un système à engrenage qui ouvre toutes les fenêtres à bascule, celles-ci se trouvent au plus haut, face à face.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Alors, la moindre bouffée d'air chaud qui s'élève vers la faîtière du local est balayée par le courant d'air et chassée de la serre. Pendant ce temps, plus bas, l'évapotranspiration des plantes d'ombre et l'évaporation de la terre qui les nourrit ajoutent à l'effet de fraîcheur. Les horticulteurs préconisent quelques ouvertures basses et estiment que leur serre devient un auvent parfait dès lors que le cumul de la surface des fenêtres hautes représente 20 % de la surface au sol.

Dans une serre d'habitation, au plus haut de l'espace la séparant du bâti, on placera deux ouvrants, face à face (généralement est/ouest). En évitant à l'air chaud de s'accumuler contre le bâti, on évite le réchauffement de la paroi de ce dernier. Si la ventilation est suffisante et continue, on obtient un auvent. On améliorera encore l'efficacité de cet auvent en plaçant une ombrière au sud qui, en maintenant les vitres à l'ombre tout l'été, leur conférera une température clémente (elles ne seront chauffées que par la lumière diffuse, mais pas par la lumière directe).

Si aucun courant d'air traversant n'est possible, il faudra se contenter d'ouvertures sur la face sud. Dans ce cas aussi, une serre peut se comporter comme un auvent en été, c'est-à-dire être une « pièce » ombragée et fraîche. Pour ce faire, il faudrait que les baies les plus hautes se trouvent au ras du plafond, que la surface de ses fenêtres ouvertes soit au moins égale à 40 % de la surface vitrée de la véranda, et que leur angle d'ouverture soit supérieur ou égal à 45°. Dès lors que ces trois conditions seront remplies, on pourra considérer que la serre est devenue un auvent.

On aura ainsi transformé une serre (centrale de chauffage) en auvent (ombrage de rafraîchissement de la face sud). Si ce volume abrite des plantes ou des fleurs, l'effet sera encore accentué (rappel : l'évapotranspiration de la plupart des plantes commence à 21,4 °C).

Triple vitrage

En plaine, les serres de Provence sont exclusivement pourvues de double vitrage. Le triple vitrage limite trop l'apport d'énergie par l'irradiation, et les hivers ne sont pas assez rigoureux pour justifier le surcroît d'isolation qu'ils apportent.

Les mestres ont très vite compris l'intérêt de l'effet de serre. D'autant que, puisqu'ils construisaient en accumulant des matériaux lourds, ils voyaient bien que le moindre rayon de soleil qui, à travers une vitre, atteignait la surface d'un de ces matériaux et le réchauffait tout en réchauffant la pièce.

Avant le XVIII[e] siècle, on soufflait le verre à la canne. Les vitres étaient donc de petit format. Chaque vitre étant maintenue par un châssis, la part d'une fenêtre qui laissait passer les rayons solaires était relativement faible. Après 1700, on découvrit que l'on pouvait laminer le verre et donc augmenter les dimensions des vitres. La part des châssis dans les fenêtres devenant moindre, plus de rayons solaires traversaient chaque mètre carré de fenêtre. Aussi, les mestres utilisèrent de plus en plus de vitrages. D'abord dans les maisons très

Patio et atrium

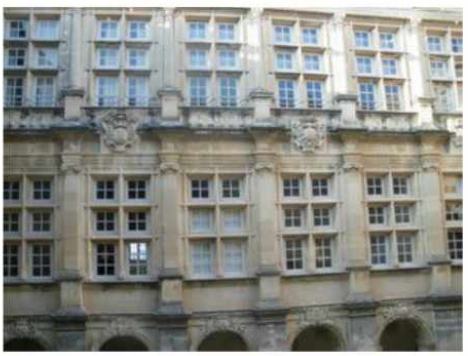
Deux systèmes à la fois. Dans les deux cas, il s'agissait de créer un espace tempéré qui communiquait avec la maison par des portes et des fenêtres. Les pièces de repos et la pièce principale de la famille donnaient sur l'atrium : un espace sombre et très frais. Les pièces de plaisir, celles où l'on était relativement actif, utilisaient toute la luminosité d'un jardin enclos : on y mangeait à l'ombre d'un auvent en profitant des fleurs du patio.
Les murs, du patio comme de l'atrium, étaient construits en continuité avec ceux de la maison. Le pont thermique était donc formidable. Il participait largement à la tempérance du logis.

Copyright © 2016 Eyrolles.

cossues, puis, à mesure que le coût du verre diminuait, ils en employèrent pour des clients moins fortunés. Les vitrages de grandes dimensions ne devinrent un produit courant qu'avec l'invention du verre étiré (xx^{e} siècle) puis, surtout, avec l'industrialisation à grande échelle du « verre flotté ». On retrouve cette chronologie dans les façades des bastides ou des mas provençaux.

Au début du XVIII^{e} siècle, les ouvrants vitrés se multiplient sur la façade sud.

À la fin du XVIII^{e} siècle, la richesse des nobles provençaux leur permet d'utiliser une grande quantité de vitrage (le verre est soufflé à la bouche, donc chaque vitre est de petite taille).



Château de Suze-la-Rousse. En 1885, le verre laminé est devenu une norme. Ici, toute la surface non porteuse de la façade sud a été utilisée pour capter la chaleur de l'irradiation solaire. .

2. Les pièces ouvertes

Auvent

Un auvent est théoriquement un simple ombrage, un bout de toit appuyé sur quelques poteaux au sud. Il faut en dimensionner correctement l'ombrage pour que, en été, les rayons solaires ne viennent pas chauffer le mur et que, en hiver, le soleil y pénètre à plein, quelle que soit l'heure de la journée.

Le 29 juillet, il fait très chaud, on tient à abriter la façade sud sous une ombre constante, toute la journée. Mais cet auvent assurera la même ombre le 14 mai (symétrique par rapport au solstice du 21 juin), or c'est une époque où l'on cherche encore la chaleur. Pour un même angle solaire, cette différence entre la puissance de l'irradiation et la chaleur ressentie sera encore plus importante le 5 août/7 mai, etc. Il n'est pas toujours possible de tirer parti de l'adaptation des végétaux au climat. Pour concilier les besoins de chaleur, on envisage de plus en plus des « ombrières » amovibles au sud de l'auvent (canisses, bâches, bambou, voiles, stores...). Nos anciens faisaient souvent appel à une « ombrière » basse : les bancs. Un banc accolé à un mur ressemble à une ombrière portable. Du haut de ses cinquante centimètres, chaque banc peut conserver un pied de mur à l'ombre, surtout à l'automne, quand il fait encore chaud. En hiver, on rentrait les bancs et on ne les mettait pas contre le mur avant que le printemps n'ait bien réchauffé

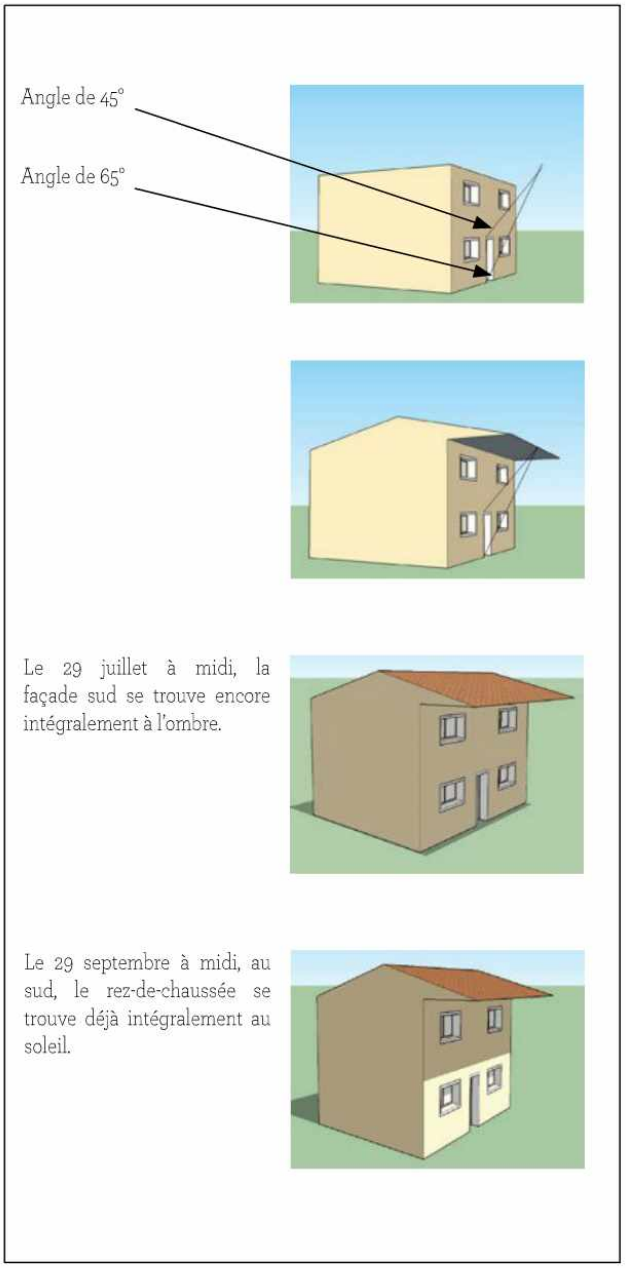
Copyright © 2016 Eyrolles.

Château de Suze-la-Rousse, détail. On remarque que les deux avancées de pierre, qui séparent horizontalement les surfaces vitrées de chaque fenêtre, leur assurent un ombrage efficace en été. Toute la façade reçoit le soleil d'été, mais tous les vitrages restent à l'ombre.

la maison. Un parterre de rosiers en pied de mur aurait le même effet.

Tonnelle

Une tonnelle ne se dessine vraiment qu'à partir de mai, lorsque la chaleur devient redoutable. Alors, son ombrage délimite une pièce, souvent proche de la cuisine, où il fait bon se restaurer. Mieux qu'un auvent, elle laisse s'élever l'air chaud entre ses feuilles. Elle n'ombrage pas le mur au début du printemps, lorsqu'on accueille avec bonheur les rayons du soleil qui nous réchauffent après l'hiver.



L'ombrière ci-dessus a les caractéristiques suivantes : d'une part, capter tous les rayons du soleil lorsque sa trajectoire passe en dessous d'un angle de 45° ; d'autre part, se protéger de tous les rayons du soleil lorsqu'il passe au-dessus d'un angle de 65°.

En reportant l'angle de 45° sur le haut de l'ouvrant le plus haut, et l'angle de 65° sur le bas de l'ouvrant le plus bas, on définit une ligne. Si le bord de l'ombrière passe par cette ligne, l'ouvrant sera au soleil tout l'hiver mais à l'ombre lorsque l'irradiation solaire est forte. Ceci est valable pour un ouvrant comme pour une façade.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Patios

Dans l'Histoire, certaines pièces tampons n'eurent pas de toit : les patios. D'autres eurent un toit incomplet : l'atrium. Les Romains utilisèrent les deux systèmes à la fois. Dans les deux cas, il s'agissait de créer un espace tempéré qui communiquait avec la maison par des portes et des fenêtres. Les pièces de repos et la pièce principale de la famille donnaient sur l'atrium : un espace sombre et très frais. Les pièces de plaisir, celles où l'on était relativement actif, utilisaient toute la luminosité d'un jardin enclos : on y mangeait à l'ombre d'un auvent en profitant des fleurs du patio. Les murs, du patio comme de l'atrium, étaient construits en continuité avec ceux de la maison. Le pont thermique était donc formidable. Il participait largement à tempérer le logis.

Les Espagnols d'Al Andaluz améliorèrent considérablement le système du patio (IXe siècle).Ils couvraient le sol avec des galets (forte masse thermique) plantés dans du sable, tous en contact les uns avec les autres (calade andalouse). Ils plaçaient la citerne sous ce tapis de pierre. La moindre pluie humidifiait ce sable et le moindre rayon de soleil sur les pierres évaporait cette humidité. Le mur sud, au moins aussi haut que l'égout du toit, était couvert de plantes grimpantes caduques. Ils obtenaient une pièce tampon dont la température, les jours d'été, restait 10 °C plus basse que l'air extérieur. Toutes les pièces de la maisonnée se rafraîchissaient en ouvrant leurs fenêtres sur le patio.

Une marche séparait les pièces à vivre du sol du patio pour éviter qu'un orage trop violent, avant d'être bu par le sable, aille jusqu'à mouiller le dallage des pièces à vivre. Les trois portes qui donnaient sur le patio étaient construites en deux parties superposées. En été, elles restaient complètement ouvertes pour profiter de la fraîcheur du patio. Au printemps, on fermait leurs parties basses durant la matinée pour que l'air nocturne capté ne refroidisse pas les pièces à vivre (puis on les ouvrait). En hiver, les deux parties des portes restaient fermées, mais au matin on ouvrait un bon moment les portes de l'atelier (celle qui donnait sur

Tonnelle végétale qui garde l'humidité pour rafraîchir la maison en été.

Auvent provençal.

Dimensions d'un patio

Dimensions d'un patio d'Al Andaluz : la largeur du patio était souvent égale à 1,618 fois la hauteur à l'égout, et généralement sa longueur représentait 1,618 fois la largeur (1,618 étant une approximation du nombre d'or).

Copyright © 2016 Eyrolles.

le patio et celle qui lui faisait face) de façon à vider le patio de son air froid nocturne. Le mur nord du patio (celui qui donne vers le sud) était construit en continuité avec celui de la maison. Il constituait donc un formidable pont thermique. Les Andalous s'en servirent pour réchauffer le mur nord de leur logement.

- En été, dans un patio, l'évapotranspiration des plantes grimpantes refroidissait encore le mur dont la base avait été refroidie par l'évaporation de la terre dans les bacs à plantes maçonnés. Portée au sein du mur nord, une onde de chaleur se déplaçait de l'intérieur de la maison vers le patio, par conduction.

- En hiver, le mur nord du patio était réchauffé toute la journée par le soleil, puisque les plantes caduques avaient perdu leurs feuilles. L'onde thermique se déplaçait dans le mur nord, du chaud vers le froid, tout au long, jusqu'à réchauffer la partie arrière du logement.

3. Pièces tampons d'aujourd'hui

Pièce tampon centrale

Les cages d'escalier des immeubles d'aujourd'hui sont assimilables à des pièces hautes comme l'immeuble et parcourues de grandes volées de béton très armé. Elles sont souvent centrales. Elles traversent toutes les dalles du bâtiment et profitent de leurs ponts thermiques linéiques : c'est ce qui, en hiver, réchauffe la pièce tampon que constitue chaque cage d'escalier. Cette pièce tampon est un puits d'air. Or l'air immobile a tendance à se stratifier : il fait chaud en haut d'une colonne d'air et plus frais en bas. Mais dans une cage d'escalier, les marches sont faites d'un béton armé de beaucoup d'acier et, surtout, les rampes métalliques conduisent la température tout au long : elles éviteront pratiquement toute stratification de l'air dans la pièce. Une cage d'escalier est donc une pièce tampon où l'on se déplace (on y supporte une température de 15 °C en hiver), dont la température est à peu près homogène et qui communique avec toutes les pièces de l'immeuble par les ponts thermiques que constituent les dalles de plancher qu'elle traverse. Il suffirait de concevoir un mode passif qui réchauffe ce volume en hiver et le rafraîchisse en été pour tempérer toutes les habitations de l'immeuble. Par exemple : y déverser l'air frais nocturne l'été et y faire passer la chaleur émise par les machines que l'on utilise surtout l'hiver (pompes à chaleur, eau chaude sanitaire, chauffage, etc.).

Pompe à chaleur

Les pompes à chaleur modernes captent la chaleur du milieu dans lequel elles se trouvent et l'introduisent dans le logement. Elles fonctionnent sur la base d'un système thermodynamique, comme un réfrigérateur, en ce sens que l'énergie qu'elles consomment sert à animer un compresseur et non pas un émetteur de chauffage. De ce fait, lorsque l'air (ou l'eau) dont elles pompent les calories est relativement peu froid, elles arrivent à multiplier cette chaleur beaucoup plus qu'elles ne consomment d'énergie (le COP mesure ce coefficient multiplicateur). Aussi les pompes à chaleur (PAC) sont-elles particulièrement efficaces. Ce n'est plus le cas quand l'air qu'elles captent est froid : leur COP devient de plus en plus faible. Il peut même devenir négatif : si l'air est très froid, la PAC consomme plus d'énergie électrique qu'elle n'apporte de chaleur. Bref : lorsqu'il fait très froid, elle ne chauffe pratiquement plus, mais consomme beaucoup. Une PAC efficace ne devrait donc jamais capter d'air trop froid. Ce qu'assurent les pièces tampons, y compris celles à ciel ouvert. Placer une PAC dans l'atmosphère tempérée d'un patio permettrait d'en multiplier l'efficacité. Le couplage de la solution de nos anciens (le patio) et d'une solution très moderne (la PAC) offre un bon exemple de l'intérêt de la bioclimatique dans la conception de bâtiments passifs. Or on nous dit que, en 2020, 20 % des bâtiments seront chauffés par une PAC.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Pièces tampons latérales

Nord : les pièces tampons adossées à la paroi la plus froide d'un bâtiment seront vraisemblablement les plus fraîches. Cette façade comportera un minimum d'ouvrants de façon à éviter l'apport de frigories (les ouvrants d'une maison bien isolée sont assimilables à des brèches dans l'isolant). Aussi, le long de la paroi nord, nous trouverons des pièces fraîches et peu éclairées. Caractéristiques que l'on considère comme idéales pour des placards, cafouches, celliers, mais aussi pour des espaces où nous nous déplaçons toujours : couloirs, escaliers, sas d'entrée... On peut aussi considérer des pièces qui seraient à l'extérieur du volume isolé et dont la disposition au nord protégera l'ensemble du bâti du froid ou des rafales du mistral : garage, cabane de jardin, buanderie. Parfois, un patio s'avère être la meilleure des solutions constructives (et décoratives) ; dans ce cas, on sera vigilant à prévoir une évacuation de l'air froid (en hiver) vers une pente. Sinon, on utilisera les végétaux : cyprès, arbres persistants, bambous, etc., surtout dans les zones humides.

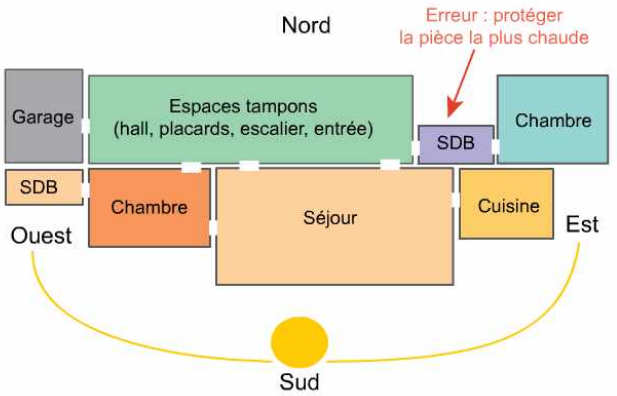
Ouest : si, comme dans le Luberon ou sur la côte méditerranéenne, le mistral arrive par l'ouest, une cabane (éventuellement vitrée) protégera la maison des caprices d'Éole, elle pourra déborder du bâtiment pour en protéger la façade sud. Dans tous les cas, la paroi ouest devra être protégée du soleil des après-midi d'été, au-delà de sud + 45° : auvent bas, garage, hangar, paroi ventilée ou bien rangée d'arbres. Un albédo faible du sol en ouest est fortement conseillé : parterres de plantes ou de fleurs, herbe, arbustes bas, etc.

Est : lorsque le froid humide arrive par l'est (pour les vallées provençales dirigées vers les Alpes, par exemple), la pièce tampon sera encore plus efficace si elle devient bâtiment tampon. Elle sera alors située hors du volume chauffé et, éventuellement, s'en désolidarisera. Sa forme sera conçue pour dévier la veine humide et en protéger le bâtiment d'habitation. Il est souvent souhaitable que ce bâtiment tampon, dans l'axe de l'arrivée d'air froid et humide, comporte une cave (idéale pour le vin, dans cette orientation). Une autre solution pour protéger le bâtiment de l'humidité consiste à élever une butée de terre dominée par une haie dense.

À noter

Une pièce tampon est conçue pour baigner de chaleur une partie des parois des pièces à vivre quand il fait froid dehors, et de fraîcheur en été. Elle propose un volume tempéré qui protège le bâtiment des excès du climat local.

Sud : la serre/auvent est une option particulièrement efficace du point de vue thermique, si elle est orientée vers le sud. On pourra aussi se chauffer grâce à des murs capteurs recouverts à quelques centimètres de verre double vitrage ou (en altitude) par un mur trombe (voir annexe 2 « Antisèches »). Dans tous les cas, il faudra ombrager la façade en été (auvent, tonnelle, ombrière, vigne vierge, plantes caduques grimpantes, etc.) et lui éviter toute ombre en hiver. En Provence, l'orientation de la façade qui capte le plus de



Ce schéma traitant des pièces tampon, réalisé d'après un document de l'Ademe, a une valeur informative certaine, mais le plan correspond mal au climat de la vallée du Rhône.

Copyright © 2016 Eyrolles.

chaleur par irradiation est précisément comprise entre sud + 5° et sud + 15°.

Le renfoncement marqué « ERREUR » offre une excellente prise au vent pour le mistral. Il y créera un point froid. D'autant plus qu'il y aura de l'humidité venant du nord (plantes, jardinière, piscine, bassin) vers cette pièce de « bains ». En cas de rénovation, si des arbres persistants (cyprès, chênes verts) protègent cette zone des turbulences du vent et si le toit n'est pas trop élevé, on pourra unir les murs nord des « espaces tampons » et de la « chambre », créant un patio. Il suffira de couvrir la face sud de ce mur de plantes grimpantes pour obtenir un air tempéré. Si, en dessous, ce mur a été peint en blanc, dès l'hiver, l'albédo fera considérablement diminuer l'humidité du côté sud du patio (et apportera de la lumière par réflexion sur la face nord de la pièce de « bains »).

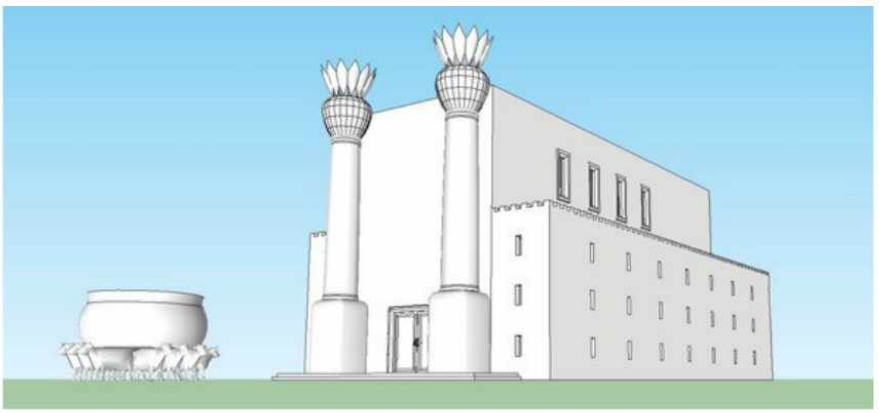
Dans le cas d'une construction neuve, le fait de pivoter sur le plan les deux salles de « bains » (dans l'axe vertical plus qu'horizontal) suffit à protéger toutes les pièces principales. L'idéal étant alors que le mur nord de la « chambre » nord soit protégé par un espace tampon (placards, penderies, etc.). Au sud de la chambre, on placera des matériaux lourds (bibliothèque, meubles) qui accumuleront la chaleur dégagée par la cuisine et tempéreront la pièce, la rendant plus propice à un sommeil.

Une solution bioclimatique ancienne

Une solution parfaite avait été trouvée par les Égyptiens lors du refroidissement climatique 2000 ans avant notre ère. Pour protéger le mur nord du palais du pharaon, devenu trop froid (vent dominant), ils avaient maçonné des placards pleine hauteur tout le long de la paroi. Leur lame d'air, immobile lorsque le placard est fermé, fait espace tampon entre le mur froid et la pièce à vivre. Elle se comporte d'autant plus comme un isolant que, en son sein, les fibres des tissus et des vêtements piègent l'air. Or l'air parfaitement immobile est l'un des meilleurs isolants qui soient. Donc un placard plein de tissus et de vêtements isole fort bien. Accessoirement, conserver des vêtements au frais diminue considérablement le spectre des insectes ou bactéries qui pourraient y vivre, surtout si l'endroit est sec.

Le Temple de Salomon

La Bible contient une abondante description de la taille et de l'apparence du Temple, mais elle

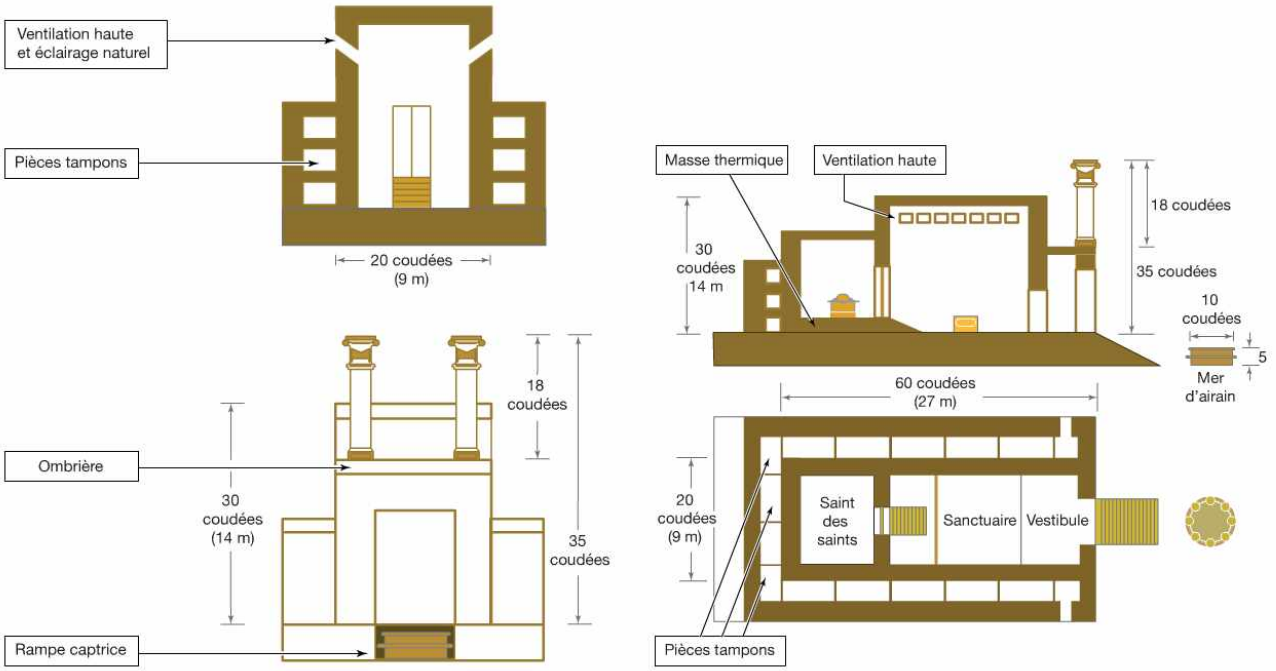


Le Temple de Salomon fut un bâtiment extraordinaire en son temps, pour son financement et sa construction en 515 av. J.-C. et la magnificence de sa reconstruction en 20 av. J.-C.

Copyright © 2016 Eyrolles.

ne donne qu'un détail constructif et un seul : les poutres qui couvraient les pièces tampons reposaient sur des corbeaux de bois, sans contact direct avec le mur. Par contre, la Bible décrit des éléments de décoration : l'intérieur du temple était couvert de panneaux de bois jusqu'à 2,50 m du sol, surmontés de tentures de laine décollées de la paroi. Ce qui, en termes de bioclimatique, peut se traduire ainsi :

- diminution des ponts thermiques structurels : ils sont restreints à une transmission thermique bois/bois sur une seule face (plus faible que bois/pierre sur cinq faces), limitée aux surfaces de contact entre les corbeaux et les poutres ;
- annulation de l'effet de « paroi froide » sur les fidèles : il y a une lame d'air entre boiserie et paroi qui crée une rupture dans les conductions thermique et hydrique ;
- pièces tampons : elles ceignent tout le bâtiment cultuel, sauf la façade. Elles isolent d'autant mieux qu'elles sont ventilables (courant d'air lent mais constant) ;
- masse thermique : à l'intérieur du bâti, le Temple est construit sur une plate-forme maçonnée de 3,50 m de haut pesant environ 600 tonnes ;
- sas d'entrée : trois maquettes successives ont abouti à la construction d'un sas précédé d'une ombrière ;
- chauffage par conduction : l'escalier d'accès (rampe de captage) débouche, 7,20 mètres plus loin, dans l'espace cultuel, soit un déphasage de six mois ;
- éclairage : chaque pièce est éclairée naturellement ;
- ventilation traversante : de grandes ouvertures se font face au plus haut du temple.



Plan, façade et coupes du Temple de Salomon.

Copyright © 2016 Eyrolles.

10| Confort thermique

La plupart des méfaits que connaissent nos logements actuels proviennent d'une faible prise en considération de l'humidité que l'on y génère. Pour éviter que l'air qui sort du logis en prélève trop de calories, certains en limitent trop sa ventilation et beaucoup oublient que les parois peuvent aussi réguler les pics d'humidité. La bonne santé des habitants repose pourtant sur la gestion de l'humidité dans le logis.

SOLUTION BIOCLIMATIQUE 11. LA VENTILATION

On n'imagine plus mettre un bonnet de nuit pour dormir : on ne vit plus comme nos anciens.

Les émissions mécaniques de chaleur dans nos habitats se multiplient (fours, micro-ondes, appareils en veille, éclairages, moteurs de réfrigérateur ou congélateur). Nos modes de vie produisent une grande quantité de vapeur d'eau (eau chaude surtout, mais aussi machines à laver ou à sécher). La combinaison « chaleur et humidité » favorise la prolifération de colonies bactériennes et autres acariens, ce qui pose un problème de salubrité. Par ailleurs, les ameublements et la décoration des foyers multiplient les émetteurs de composés organiques volatils dangereux. Or les bâtiments que l'on va construire seront étanches à l'air et leur isolation devra être remarquablement performante.

L'essentiel des déperditions thermiques se fera donc via la ventilation. Elle devra aussi assurer l'évacuation d'une bonne part de la vapeur d'eau. La santé des habitants impose qu'elle garantisse un air sain, d'autant que nos modes de vie citadins nous font passer plus de 90 % de notre temps en espace clos.

L'équation finale est complexe : comment ventiler un bâtiment pour que son intérieur soit sain et confortable tout en le chauffant en hiver et en le refroidissant en été ? Il est, en effet, difficile de concilier les exigences, parfois contradictoires, de nombreux sous-systèmes qui influent sur les économies d'énergie, la salubrité, la sécurité et le confort des occupants ainsi que sur la durabilité du bâtiment.

La réponse que nous apportent les industriels d'aujourd'hui est constante : installer une ventilation performante, puissante et continue, adaptée à la taille et aux besoins du foyer.

On a d'abord multiplié les ventilations sur les points où l'excès d'humidité créait un problème

Copyright © 2016 Eyrolles.

majeur : hotte dans la cuisine et VMC dans les pièces d'eau. L'expulsion de l'air (dépression) était compensée par une infiltration autour des ouvrants. Le principe était simple, peu coûteux et adapté (on ne déclenchait l'extraction qu'en cas de besoin). Avec la vapeur d'eau, ces systèmes retiraient énormément d'énergie de l'enceinte du foyer et chacun des conduits d'évacuation créait un pont thermique puissant dans l'enveloppe. Étant donné le coût actuel des énergies fossiles, cette méthode a atteint sa limite.

1. Ventilation double flux

À l'heure des économies, tous les décideurs voient bien qu'il s'avérerait plus économique de chauffer un bâtiment parfaitement étanche à l'air (une bouteille Thermos), mais... les habitants y mourraient asphyxiés. L'énergie représentée par le chauffage de l'air renouvelé peut représenter 30 % de la consommation totale d'énergie des bâtiments occupés. Les industriels ont donc mis au point la solution technique parfaite (de leur point de vue) : la ventilation double flux. L'air extrait (vicié) du bâtiment y est privé de ses calories, lesquelles permettent de préchauffer l'air (neuf) qui est insufflé. Les appareils les plus performants récupèrent plus de 90 % des calories de l'air sortant.

La ventilation double flux (VDF) implique que l'air sortant et celui entrant passent par un même point où se trouvent les ailettes d'échange calorique et les deux ventilateurs. Cette centralisation autorise la pose de filtres destinés à nettoyer l'air entrant de ses particules en suspension. La machinerie ne permet une ventilation correcte que si une série de gaines permet d'apporter l'air neuf dans toutes les pièces et une autre de capter l'air à évacuer. L'intérieur de l'enveloppe isolée est donc truffé de canalisations inoxydables dévolues au renouvellement d'air. Les emplacements des bouches sont calculés pour optimiser l'aération, rien ne doit gêner les courants d'air prévus : la décoration et l'ameublement seront adaptés en fonction (et non le contraire).

L'installation d'une VDF est donc onéreuse en termes de coûts fixes (matériel, main-d'œuvre d'installation et espace occupé). Les coûts variables prendront en compte la consommation électrique nécessaire à la motorisation permanente des deux ventilateurs (24 h/24, 365 j/365) et on n'oubliera pas d'y ajouter un coût de main-d'œuvre : une VDF dont les filtres n'auraient pas été nettoyés durant trois mois verrait diminuer considérablement (jusqu'à 40 %) le volume d'air insufflé. Nettoyer, voire changer, régulièrement ces pièces représente un coût variable récurrent. Les poussières contaminantes des villes ou les pollens des campagnes saturent vite ces membranes ultraperformantes. Dès lors que le débit de l'air entrant se trouve être inférieur à celui qui sort, il se crée une dépression à l'intérieur du bâtiment. Celle-ci multiplie l'entrée des « particules fines » (celles dont le diamètre est inférieur à 3 microns) qui arrivent encore à se faufiler entre les poussières collées sur les filtres. Ce sont les plus nocives pour l'organisme, puisqu'elles pénètrent dans le sang et que notre corps ne sait pas les expulser. Elles se trouvent particulièrement concentrées dans les villes (diesel et laine de roche).

Une ventilation double flux comporte des pièces mobiles, donc des pièces d'usure. Que se passera-t-il si l'impensable (la panne mécanique) a lieu en plein hiver lorsque l'essentiel de l'apport de chauffage repose sur l'efficacité de la VDF ? Un autre drame est à envisager : si une colonie de bactéries venait à s'implanter dans l'une de ces gaines de ventilation, comment s'en rendrait-on compte ? Elle n'est pas démontable, puisqu'elle est intégrée dans les parois : comment la nettoierait-on ? Des procédés ont été mis au point en ce sens, tous théoriquement parfaitement efficaces, et les vingt-cinq années d'expérience cumulées

Copyright © 2016 Eyrolles.

semblent leur donner raison. Elles disent que tous les problèmes majeurs rencontrés sont la résultante d'erreurs humaines (installation peu scrupuleuse). Ce qui suppose, si l'on veut se rassurer, que la personne qui vérifie la conformité de la pose des gaines de ventilation n'ait pas d'intérêt commun avec les installateurs.

Dans les habitats du bord de la Méditerranée, où les besoins en chauffage sont moindres, la seule énergie nécessaire aux ventilateurs de la ventilation double flux peut s'avérer supérieure au besoin de réchauffement de l'air intérieur.

Une autre solution s'impose dans les habitats méditerranéens : les ventilations hygroréglables se déclenchent dès que le capteur mesure une humidité trop importante. Elles régulent la quantité de vapeur d'eau dans l'air intérieur, certaines sont couplées à un récupérateur de chaleur de l'air sortant. Leur efficacité vise surtout au confort des habitants et à la conservation du bâti. Il s'agit, de fait, d'une ventilation naturelle assistée. En évacuant l'air humide des pièces d'eau ou de la cuisine, le système crée une dépression qui va aspirer l'air extérieur via les bouches prévues pour cet effet. Cela suppose que les entrées d'air soient correctement réparties, ce qui n'est pas toujours possible dans les pièces aveugles des appartements (d'où le détalonnage des portes et les grilles de transfert... qui transmettent aussi les bruits). La section des entrées d'air des ventilations hygroréglables se modifie automatiquement en fonction du taux d'hygrométrie de la pièce desservie. Elle permet donc de moduler le volume d'air entrant en fonction de l'occupation et de l'usage des pièces. Le débit diminue en hiver, puisque le taux d'humidité est moindre. Certaines sont munies de dispositifs anti-retour qui interdisent à l'air chaud de sortir par une « entrée » d'air.

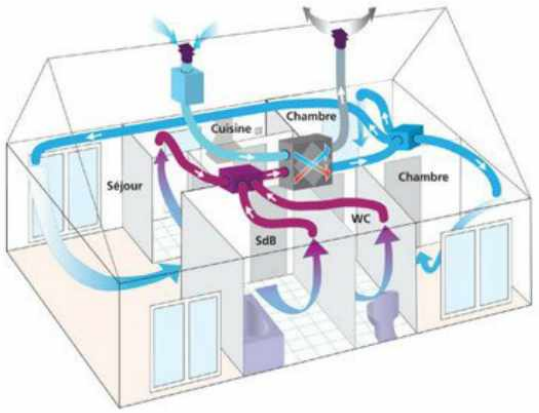


Schéma type d'installation d'une ventilation double flux. © Autogyre.
Une VDF est animée par un moteur tournant constamment. En d'autres termes, c'est un émetteur de chaleur permanent. L'installation fréquente de la VDF dans les combles y crée un point chaud non négligeable, surtout en été.

Dans tous les cas, quel que soit le coût de l'énergie, il faut garder à l'esprit que la ventilation est une nécessité vitale ! Notre bon sens nous le rappelle : même si l'apport d'oxygène est insuffisant, la respiration des habitants et la combustion du gaz ou du bois en enlèvent encore.

Et la bioclimatique ?

Nos anciens se posaient la même question que nous : comment ventiler un bâtiment pour que son intérieur reste sain et confortable, tout en le chauffant en hiver et en le refroidissant en été ?

Ils ne connaissaient pas d'autre pollution que celle des fumées (par ignorance, sans doute). La qualité de l'air du logis n'entrait pas dans leur questionnement. Les contaminations intérieures dues aux solvants, vernis ou colles ne les préoccupaient pas plus. Chaque année, à la Saint-Jean, on badigeonnait l'intérieur des pièces à vivre avec le meilleur bactéricide de l'époque : la chaux. Ce qui éliminait donc la problématique de « l'air sain ». La question devenait : comment chauffer en hiver, refroidir en été et évacuer poussières, fumée et vapeur d'eau ?

Les moyens dont ils disposaient étaient limités. Les ventilations mécaniques n'existaient pas plus que les doubles vitrages. Les vis n'avaient pas été

Copyright © 2016 Eyrolles.

Précision de L'Ademe

« Peu de contrôles ou vérifications sont aujourd'hui effectués sur les installations de ventilation et le peu qui est réalisé révèle d'importants défauts (conception, réalisation, maintenance) et notamment presque systématiquement des défauts de débit d'air (manque ou inadaptation). » En règle générale, l'Ademe constate que les habitants d'un logement effectuent rarement les contrôles et l'entretien obligatoires. À titre d'exemple : moins de 5 % des habitants font contrôler et entretenir leur chauffe-eau tous les ans.

inventées et les joints non plus (un peu de chute de pâte à tarte, en début d'hiver, pouvait colmater une fuite au bas d'une fenêtre...). On savait couvrir une vitre trop froide de papier huilé, mais le papier coûtait si cher que bien peu pouvaient s'en offrir. Même les plus imaginatifs n'auraient pas rêvé d'ailettes en aluminium permettant de récupérer la chaleur de l'air extrait d'une VDF.

En Provence, la ventilation ne posait problème qu'au cœur de l'hiver. On y vivait calfeutrés autour du foyer, dans une petite pièce principale... endurant le froid jusqu'aux beaux jours. Au nord de cette pièce, une porte permettait d'accéder au cellier. Celui-ci servait aussi de cave, n'était pas chauffé et était chichement éclairé par une seule petite fenêtre. Au sud, on trouvait généralement deux grandes fenêtres et la porte d'entrée. Le mur sud se chauffait au soleil bas d'hiver. Les autres murs de la pièce principale se contentaient de la chaleur qui leur provenait de l'âtre. Le sol (sans vide sanitaire) était frais, le plafond accumulait les calories dégagées par le foyer et les habitants (puisque l'air chaud monte). Donc le sol était plus froid, le mur nord un peu moins, le mur sud encore moins, et le plafond accumulait la chaleur. Tous les matins, l'aération de la pièce d'habitation était systématiquement précédée d'un bon coup de balai, voire de chiffon. Il suffisait ensuite d'ouvrir la porte vers le cellier pour que son air froid se précipite vers la pièce principale. Il s'y formait un mouvement de convection : l'air qui léchait le sol montait en un courant d'air ascendant vers le plafond, se refroidissait un peu, descendait alors le long du mur nord de la pièce en se rafraîchissant encore un peu, balayait le sol frais et remontait le long du mur sud en s'y réchauffant. La maîtresse de maison continuait son chemin, à travers ce mouvement d'air, et allait ouvrir la fenêtre du cellier. L'air étant encore plus froid dehors, au ras du mur nord, que dans le cellier, le courant d'air augmentait. La mère de famille revenait dans la grande pièce et protégeait la braise de l'âtre avant d'ouvrir en grand les fenêtres et la porte de la façade sud. Toutes les poussières brassées dans l'air par le mouvement de convection initial se trouvaient comme aspirées par les ouvertures vers le sud. Une demi-heure plus tard (selon certains curés, la maîtresse de maison en profitait pour réciter un chapelet), sa maisonnée parfaitement assainie, elle fermait la fenêtre du cellier, la porte, puis les ouvrants de la salle. La lourde masse thermique du bâtiment rétablissait rapidement la température antérieure ; éventuellement, on ravivait la flamme de quelques pommes de pin. La pièce principale retrouvait son atmosphère initiale et chacun reprenait ses occupations.

2. Effet tuyère

En saison chaude, tout était plus simple : les hommes restaient au-dehors dès le lever du jour. Le cellier restait toujours plus frais que la salle, puisqu'il était au nord alors que la pièce principale donnait au sud. Les différences de température assuraient un courant d'air constant. Si le petit jour n'était pas trop chaud, on pouvait laisser les fenêtres au sud ouvertes plus longtemps. Aux intersaisons, on les laissait même ouvertes toute la journée, en prenant soin de les ombrer avec les volets aux heures chaudes. Alors, en dehors des

Copyright © 2016 Eyrolles.

périodes de ventilation, on ne fermait la fenêtre du cellier que les jours où le mistral soufflait.

Il aurait fallu un désastre pour qu'une maîtresse de maison n'aère pas sa pièce chaque matin. Cette opération était donc systématique et s'imposait à toute considération.

Le mur d'appui de la fenêtre du cellier était épais, sa partie intérieure s'évasait, favorisant l'entrée d'air. L'effet de tirage reposait essentiellement sur la conception de zones à température différente (écarts de l'ordre de 10 °C, voire plus). Le mouvement de convection ne dépendait que de l'opposition thermique d'un plafond plus chaud que le sol frais. Des ouvrants étaient conçus en vis-à-vis, de taille de plus en plus importante à mesure que l'on allait du froid vers le chaud (puisque les gaz se dilatent lorsqu'ils se réchauffent). Le corollaire d'une ventilation efficace était le manque d'originalité des maisons isolées : toutes étaient conçues selon le même plan de base.

Le renouvellement d'air, lors de ces ventilations forcées, dépassait allègrement le taux cible de 0,25 volume par heure. Ce n'était pas toujours le cas le reste du temps, quoique les fuites d'air par la cheminée, sous la porte et autour des cadres des fenêtres s'avéraient généralement très suffisantes. La ventilation était donc efficace.

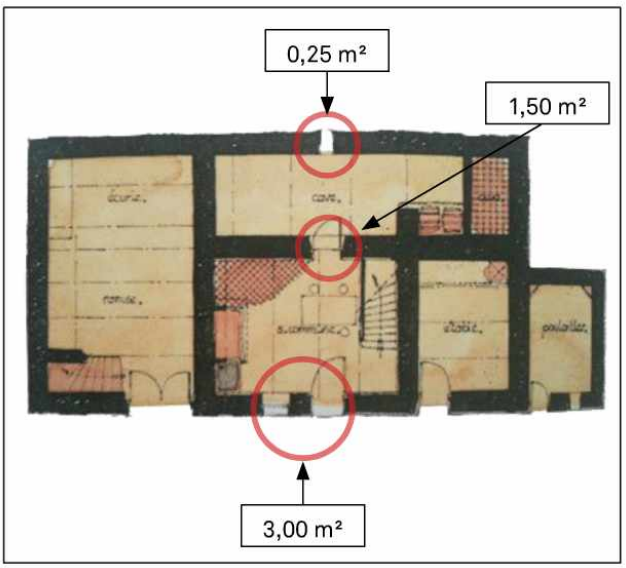
3. Changement de phase

Utiliser la ventilation pour chauffer l'habitat en hiver et le refroidir en été s'avérait a priori nettement plus complexe. Nos anciens recouraient à une solution pragmatique, une leçon que leur avait enseignée l'expérience mais qu'ils auraient été bien en mal d'expliquer : le changement de phase des matériaux.

Lorsque les liquides s'évaporent, ils passent de l'état liquide à l'état gazeux : ce changement d'état est appelé « changement de phase ». L'eau a un comportement particulier. Du fait de ses deux liaisons hydrogène, la réaction physique qui la transforme en vapeur consomme 30 % d'énergie de plus que pour tous les autres liquides. À l'inverse, la réaction de condensation (passage de l'état gazeux à l'état liquide) dégage de la chaleur.

Chaque changement d'état nécessite un transfert d'énergie qui modifie les forces de liaison entre les molécules. La quantité d'énergie nécessaire à un changement d'état s'appelle « chaleur latente de changement d'état ». Cette chaleur latente varie en fonction de la température ambiante. Elle est particulièrement élevée pour l'eau : l'évaporation de chaque gramme d'eau consomme 585 calories (à 20 °C).

Ces 585 calories sont prélevées de l'air ambiant, donc celui-ci se refroidit dès qu'il y a évaporation.Cette propriété physique est employée par tous les mammifères : le rafraîchissement par



On considère qu'à peu de choses près, les mêmes molécules contenues dans un volume d'air occupent un volume de plus tous les 3 °C. Le mestre qui a conçu cette maison s'est basé sur une température extérieure d'hiver, au nord de la maison, 18 °C plus fraîche que celle de la pièce principale. Nota : dans des combles où la température a augmentée de 30 °C en une journée, il a fallu que le toit évacue une quantité d'air proche de 10 fois le volume des combles.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Ventilation

Les puristes appellent « ventilation » le renouvellement de l'air nécessaire à notre santé et à l'hygiène des locaux. Ils appellent « refroidissement naturel » le renouvellement d'au moins quatre volumes d'air par heure avec un air inférieur d'au moins 6 °C à l'air ambiant. Il se trouve que la « ventilation » utilisée en été par les Provençaux était aussi un « refroidissement naturel ». En théorie et en moyenne, on estime que l'intégralité de l'air d'un mas est renouvelée en moins d'une demi-heure, alors qu'une maison moderne (ou un appartement non traversant) bien isolé ne renouvelle son volume d'air qu'en dix heures. En une demi-heure de ventilation, un logement à forte inertie n'a pas le temps de se refroidir.

évaporation de la sueur dès qu'il fait chaud. On ressent d'autant plus cette fraîcheur lorsqu'on se trouve à l'ombre et encore plus lorsque souffle le vent (« froid ressenti »).

La chaleur massique de l'eau est de 4,186 kJ/kg.K à 20 °C.

Nous avons appris à l'école que toute l'eau s'évapore à 100 °C. Mais un rayon de soleil ou un souffle d'air suffisent à faire s'évaporer un peu d'eau, même à 5 °C. Lorsque nous transpirons, notre corps émet une eau salée à environ 37 °C. À cette température, elle s'évapore en consommant 575 calories par gramme de l'air qui l'environne, celui qui est au contact de notre peau.

Plus l'évaporation de l'eau a lieu à température basse, plus elle consomme d'énergie. Ceux qui se sont approchés d'un petit lac, au fond d'une grotte, doivent encore se rappeler de la fraîcheur brutale qui régnait à proximité.

La réaction physique contraire est la condensation. Elle consomme généralement plus d'énergie par conduction que par convection. Un gramme d'eau qui se condense sur un mur abaisse la température de surface de trente calories. Un souffle d'air sur une jarre humide rafraîchit une pièce.

En Provence, l'atmosphère est riche en vapeur d'eau. À Carpentras, l'humidité relative varie entre 60 et 92 %, entre juillet et septembre, en l'absence de mistral. Si l'on suppose qu'un ancien Provençal aurait jugé confortables des températures intérieures comprises entre 21 et 23 °C, l'humidité qu'il aurait appréciée aurait été comprise entre 50 et 60 %. Ajoutons à cela la vapeur d'eau dégagée par la cuisine et l'eau chaude ainsi que celle exhalée par la respiration des habitants : il y avait potentiellement trop d'humidité dans l'air du logement.

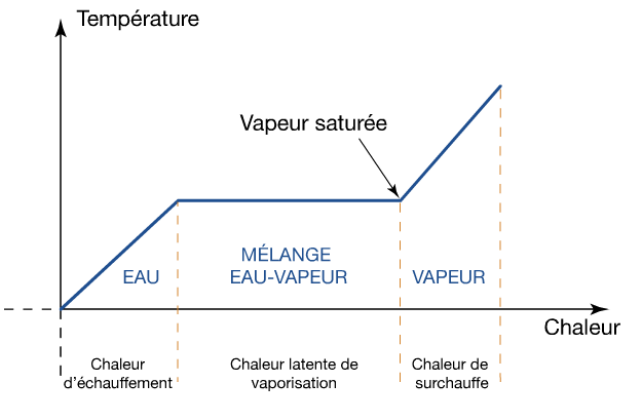
Les maisons prévoyaient donc des matériaux poreux capables d'absorber l'excédent d'humidité. Ceux-ci étaient en argile, en terre cuite (dallages, pare-feuilles), en chaux et surtout en plâtre parce que ces matériaux ont aussi la propriété de relâcher l'eau captée dès que l'air qui les environne est relativement sec (plus que tout autre matériau de construction ancien, le plâtre a la particularité de concentrer l'eau qu'il a captée à sa superficie lorsqu'il fait chaud et en son sein lorsqu'il fait froid).

4. Climatisation

Climatiser consiste à insuffler un air nettement plus froid que l'air extérieur de façon à ce que, dans la maison, la température résultante de l'air ambiant soit agréable. Comment les mestres pouvaient-ils climatiser un habitat ? Quel mécanisme simple pouvait permettre d'en réguler le débit ?

Ils utilisèrent le changement de phase de l'eau. Les mestres disposaient de matériaux constructifs poreux qui se chargeaient en humidité chaque fois que la maisonnée en générait. Il leur a suffi de placer ces matières poreuses partout où passait un mouvement d'air. Chaque fois qu'un courant

Copyright © 2016 Eyrolles.



La chaleur massique de l'eau est de 4,186 Kjoules/kg.K à 20 °C

d'air asséchait (évaporait) deux grammes d'eau, il prélevait plus d'un kilocalorie de l'air ambiant. Pour réguler le rafraîchissement qui en résultait, ces courants d'air pouvaient être générés ou arrêtés par l'ouverture ou la fermeture d'une fenêtre. Ils utilisèrent surtout le plâtre parce qu'il absorbe ou relâche très rapidement les molécules d'eau.

Aussi les plafonds des logements fortunés étaient-ils couverts de pare-feuilles ourdis au plâtre, ceux des personnes plus humbles l'étaient de roseaux (canisses) couverts de plâtre et le plafond des chambres était souvent habillé de quelques tonnes de plâtre. Les maisons comportaient généralement un escalier intérieur par lequel montait l'air chaud : il était aussi couvert de pare-feuilles et/ou de plâtre.

La ventilation traversante servait donc de climatisation en transformant les microgouttelettes d'eau en vapeur. Et puis elle transportait cette vapeur d'eau au dehors, déshumidifiant ainsi l'habitation. Les fenêtres hautes du couloir restaient closes tout l'hiver : l'absence de courant d'air annulait presque toute l'évaporation. Donc il n'y avait plus d'effet rafraîchissant : on se contentait de la lumière. D'ailleurs, le froid faisait baisser l'humidité relative dans la maisonnée.

Dans les terres masquées à l'influence méditerranéenne par des reliefs montagneux, le climat de l'arrière-pays provençal tenait du précontinental. De même, un climat rigoureux sévissait dans les Préalpes. Là, il fallait conserver le maximum de chaleur dans les volumes les plus petits possibles.

On y trouve des plafonds bas souvent construits à 2,20 m de haut. Partout ailleurs, les plafonds de Provence étaient hauts. Le rapport Rage nous cite des hauteurs moyennes variant entre 3,30 m et 3,60 m. On ne construisait pas en hauteur pour le plaisir, mais parce que cela représentait un grand confort. Au ras du plafond de plâtre et de bois passaient les courants d'air. Les fenêtres élevées restaient ouvertes tout l'été, elles assuraient une ventilation haute, donc l'évaporation, donc la climatisation des pièces à vivre.

En hiver, les fenêtres assurant la ventilation traversante restaient fermées l'essentiel du temps. Il n'y avait pas de climatisation. Donc le plâtre se surchargeait d'humidité (ce faisant, il condensait de l'eau, ce qui contribuait à réchauffer l'air ambiant).

Une saturation des parois aurait été désagréable, aussi les mestres utilisaient-ils des quantités très importantes de plâtre. Ce matériau ayant par ailleurs la particularité de diriger l'humidité vers ses parois lorsqu'il fait chaud et de la concentrer en son sein lorsqu'il fait frais, en hiver la ventilation nécessaire évaporait très peu d'eau et les parois restaient agréablement sèches au toucher.

Serre d'habitat en Provence

Imaginons un volume qui soit à la fois chaud l'hiver (une serre) et frais l'été (un auvent) : une serre est un volume qui concentre la chaleur (en hiver), grâce à l'effet de serre à travers un vitrage ; un auvent est un volume à l'ombre qui évacue l'air chaud (en été) grâce à une ventilation efficace (généralement traversante). Pour un mestre

Copyright © 2016 Eyrolles.

Évaporation / condensation

A 20 °C, l'évaporation de l'eau consomme 585 calories par gramme, tandis que la condensation de la vapeur d'eau ne dégage que 30 calories par gramme. Ce sont les liaisons polaires entre les molécules d'H_2O qui sont la cause de ce déséquilibre thermique entre deux réactions opposées. En d'autres termes : un système fermé qui alternerait les condensations et les évaporations d'eau consommerait beaucoup d'énergie.

provençal, il suffisait de concevoir un volume dont la ventilation chasse tout l'air chaud l'été et le conserve en hiver. Bref : un volume doté d'une surface vitrée au sud et de deux fenêtres hautes en vis-à-vis permettant d'évacuer l'air chaud lorsqu'elles sont ouvertes, mais de le conserver lorsqu'elles sont fermées.

L'air chaud monte. Il s'accumule vers le plafond. Une ventilation haute, continue et traversante, évacuera cet air chaud (et l'humidité qu'il porte). En Provence, une véranda orientée au sud est limitée par deux parois en est et en ouest. Sauf à midi, heure solaire, il y a toujours une différence de température entre la paroi à l'ombre et celle qui est ensoleillée. Celle-ci fournit l'énergie nécessaire à une ventilation haute de l'air chaud d'été (la puissance de la ventilation naturelle étant proportionnelle au ΔT).

En Provence, la serre d'une habitation se contente d'une façade vitrée, de trois murs, d'un sol et d'un toit (si le toit était aussi vitré, la forte irradiation transformerait la pièce en four durant tout l'été) : c'est une véranda. La principale différence entre cette serre et un auvent tient à la ventilation haute. Leur comportement thermique change selon que l'air chaud est évacué ou stocké. Une verrière dont l'évacuation d'air chaud est optimale se comporte en été comme un ombrage.

5. Le plâtre

En Provence, la ventilation était surtout utilisée en été pour rafraîchir la maison.

On s'employait aussi à protéger l'ensemble de la bâtisse des excès de chaleur. Or, en été, le toit reçoit l'essentiel de l'irradiation. Sous les tuiles, les amplitudes de température peuvent être très importantes sur une journée (dans une maison des années 1970, la charpente subit régulièrement des amplitudes thermiques quotidiennes de 50 °C !).

Les mestres utilisèrent le plâtre en grande quantité. Dans les cabanes les plus pauvres, ils l'appliquèrent sur des lits de roseaux. Plâtre et roseaux, étant poreux, captaient l'humidité de la pièce. Une ventilation rasante l'évaporait, rafraîchissant ainsi le logis.

Dans les mas, tant que le bois de charpente fut très onéreux (jusqu'à 1789), les mestres se contentèrent de monter deux à quatre tonnes de

Plâtre sur canisse.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Plâtre sur poutre « plafond provençal ».

Avant 1789.

Après 1789.

plâtre et de pare-feuilles pour un toit de 50 m². L'ensemble servait de plafond et s'appuyait sur une grande quantité de poutres de petite section. Cette énorme masse thermique, poreuse, captait tout l'excédent d'humidité émis par la maisonnée. Des ouvertures étaient réservées dans les parois du bâtiment, face à face, sous le plafond. Elles restaient ouvertes tout l'été et étaient fermées durant les mois froids. En été, le courant d'air continu léchait le plafond et rafraîchissait le logement, puisqu'il évaporait la vapeur d'eau contenue dans le plafond. Au-dessus, il laissait la fournaise régner sous les tuiles.

Après 1789, la multitude de droits de passage exigés par les nobles disparut. Tout à coup, le bois de charpente des Alpes arriva jusqu'en Provence à un coût nettement plus accessible. Alors les mestres montèrent encore plus de plâtre sous les toits, parfois ils y ajoutèrent encore un peu de masse thermique en y apposant des galets. Quatre tonnes de plâtre pour un plafond de 50 m² semblent avoir été la norme. Des poutres de forte section portaient cette lourde masse. Les mestres changèrent la position de la ventilation. Dans les maisons fortunées, de grands ouvrants rafraîchirent les combles. C'est que les toits ne

Copyright © 2016 Eyrolles.

Ventilation haute (traversante) dans une maison bourgeoise de la fin du XVII[e] siècle (Mormoiron).

Lorsque la faible hauteur sous plafond ne permettait pas d'utiliser des courants d'air hauts (cas des régions froides), on construisait une paroi de poteaux de bois et de plâtre. Une grande fenêtre au sud, collée à la paroi, faisait face à un fenestreau au nord. Entre les deux, on plaçait des meubles bas maçonnés. Les habitants actuels y ont installé un canapé : ils s'y reposent au frais, en été, mais en plein courant d'air.

sont jamais suspendus : ils reposent toujours sur des murs. Les combles communiquaient leur froideur d'hiver et leur chaleur d'été aux parois du bâtiment. Chaque point de contact entre la charpente et les parois formant un pont thermique, si les combles étaient chauds, de proche en proche, les calories se transmettaient jusqu'aux murs porteurs.

Les mestres continuèrent à édifier des ouvertures de ventilation (ouvertes en été et fermées en hiver). Ils les placèrent toujours par paire, face à face. L'innovation consista à situer la ventilation dans les combles, au-dessus de la dalle de plafond et en dessous du niveau des tuiles les plus basses, et donc à transformer « un plafond chauffé sous les tuiles » en « plafond à l'ombre d'un toit ».

Les combles étant ventilés, les toits se comportèrent comme des auvents. Les plafonds devinrent des surfaces perpétuellement à l'ombre. L'amplitude quotidienne des températures sur la surface du plafond fut divisée par deux. Les maisons devinrent encore un peu plus fraîches en été. En hiver, en général, on fermait ces ventilations par de courts panneaux de bois. Cela permettait de conserver un peu plus de chaleur sous les tuiles. Dans les maisons très hautes, à moins d'y accéder aisément par le grenier, on les laissait souvent ouvertes toute l'année.

Qualité de l'air dans le logement français

Une étude de 2007 sur 567 logements représentatifs du parc de résidences principales, « État de la qualité de l'air dans les logements français », a montré que 56 % des logements (en particulier, ceux construits de 1969 à 1982) présentaient un débit d'air totalement insuffisant au regard de la loi :
- 5,1 % des Français bouchent leurs VMC en hiver (ou toute l'année) ;
- 20 % des habitants disent ne pas aérer leur logement quotidiennement en hiver ;
- 30 % des détenteurs de cheminée ne l'ont pas fait ramoner depuis plus d'un an ;
- 30 % des habitants n'ont pas fait entretenir leur chauffage de l'année.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Terrasse tropézienne à Peillon, Alpes-Maritimes. Une terrasse tropézienne est un parallélépipède rectangle dont la face sud est reculée vers l'intérieur de façon à rester à l'ombre du toit tout l'été, tout en étant au soleil en hiver. Les anciens enduisaient cette face sud d'une teinte rouge-marron, mais aujourd'hui les baies coulissantes en verre sont plus efficaces : l'effet de serre chauffe le haut de la maison en hiver. La terrasse tropézienne étant située au plus haut, durant les mois chauds, l'ouverture des baies chasse l'air chaud de la maison. © Shutterstock/Gordon Bell.

À noter

Les courants d'air les plus appréciés sont ceux qui ventilent les pièces sans gêner les habitants. Ils sont hauts, puisque le rafraîchissement d'été est plus agréable lorsqu'il nous vient de dessus. Ils ne balayent pas les visages, cela serait ressenti comme fatigant par les habitants. La vitesse de l'air sur le visage devient désagréable dès 0,5 m/s. On laisse les malades se reposer dans des pièces très aérées, mais jamais dans un courant d'air : « Ça fait monter la fièvre. »

SOLUTION BIOCLIMATIQUE 12. RÉGULER L'HUMIDITÉ

1. Le confort du corps humain

Le corps humain dispose de deux mécanismes pour remédier aux écarts de température qui le dérangent ponctuellement. Lorsqu'il fait trop froid, une brève contraction des muscles cutanés réchauffe la peau (frisson). À l'inverse, une chaleur trop forte pour être agréable provoque la sudation. L'homme éprouve une sensation de confort thermique lorsque les conditions climatiques environnantes permettent au corps d'éliminer la chaleur produite au rythme de son métabolisme.

Une étude clinique sur une vingtaine d'étudiants en médecine a montré que si un jeune Français se trouve nu, debout et immobile, dans une pièce éclairée dont l'air est maintenu exactement à 22 °C et à 60 % d'humidité, et que les parois sont précisément à la même température, il se sent thermiquement bien (aucune sudation ni aucun frisson n'est constaté).

Le corps humain est une machine thermique dont le rendement thermodynamique est de 20 %, ce qui signifie qu'il produit et évacue cinq fois la quantité de chaleur qui lui est nécessaire. L'énergie nécessaire à l'accomplissement des fonctions vitales d'un individu en activité est de 20 kcal/heure environ. À sa température de confort, un être humain doit donc évacuer environ 100 kcal/heure. Cette chaleur, dissipée dans l'espace intérieur, se dégage de trois façons : par évaporation, par condensation et par rayonnement.

La respiration exhale un air humide à 37 °C. Le corps rayonne sa chaleur à travers les vêtements et contribue au réchauffement de la pièce, et ce d'autant plus qu'il se trouve en mouvement.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Température ressentie comme confortable

La sensation de confort thermique n'est pas une constante universelle !

Un Anglais considère qu'une température de 17,2 °C est confortable pour les soirées d'hiver dans son salon, alors qu'un Américain souhaiterait 3,6 °C de plus. Si l'habitant des lieux est un Européen de la Baltique, ses besoins différeront évidemment de celui d'un Pygmée habitué au climat équatorial. Si un individu se trouve exténué ou bien déprimé, son corps demandera une température d'ambiance d'au moins 20 °C. La couleur des murs, le spectre de l'éclairage, voire le type de décoration, influent sur la perception de chacun de ce qui, pour lui, serait la température idéale.

Les règlements disent qu'une pièce principale à moins de 19 °C est inconfortable. Mais il semblerait que l'administration ait décidé seule que les températures devaient être homogènes dans un logement et calées sur 19 °C. La médecine, elle, considère que la neutralité thermique du corps humain se situe toujours au-dessus de 19 °C : entre 20 et 26 °C.

Pour départager ces deux points de vue, il faudrait des études portant sur un grand nombre de personnes et sur une durée qui dépasse l'année. Il se trouve que les usagers des immeubles BBC (très bien isolés) peuvent moduler la température d'ambiance de leurs pièces à vivre par de très faibles et peu coûteuses variations du chauffage. Les relevés de leurs consommations corroborent leurs déclarations : ils préfèrent une température ambiante de 21 °C en hiver et ils acceptent volontiers jusqu'à 23 °C en été dans une pièce aérée. L'unanimité des personnes vivant dans ce type de bâtiment considère qu'une salle d'eau doit être chaude (24 °C), plus chaude que le salon, mais elles supportent des températures bien plus fraîches lorsqu'elles se trouvent en mouvement.

On monte un escalier à une température de 17 °C sans effort thermique, puisque notre thermodynamique musculaire génère des calories. La chambre est la pièce où nous passons le plus de temps. Le repos sera d'autant meilleur que le corps n'aura pas à lutter contre un inconfort thermique. Une température de sommeil de 19 °C semble idéale pour l'hiver (couette) tandis qu'elle monte à 21 °C pour l'été (drap).

Une habitation chauffée de manière homogène ne répond pas à ces souhaits d'aise : escalier à 17 °C, chambre à 19 °C, pièce principale à 21 °C, salle d'eau à 24 °C.

Outre les logements, un gymnase sera jugé à température idéale quand il y fait 17 °C, tandis qu'une infirmerie ou un vestiaire exigeront un minimum de 22 °C.

Sensations d'inconfort

Une simple régulation de la température de l'air intérieur ne suffit pas à rendre l'atmosphère agréable. Le confort thermique dépend de nombreux facteurs, certains sont psychologiques. Des couleurs froides au mur donnent envie d'une température ambiante plus élevée. Un hôpital qui chaufferait ses chambres à 19 °C serait considéré comme particulièrement froid. D'autant que le manque de tonus, le stress et la maladie donnent envie de chaleur. À l'inverse, une abondance de matières chaudes (velours, laines, bois) dans la décoration permet de tolérer un thermomètre plus bas dans la pièce. À 23 °C dans une pouponnière, on ouvre la fenêtre (ou on se dénude).

À partir de 20 cm d'une paroi, la température ressentie correspond à la moyenne entre la température de surface de ladite paroi et celle de l'air qui nous environne. Dès que cet écart dépasse 5 °C, on ressent nettement l'effet de paroi froide, au point que notre métabolisme mesure une différence de température sur notre peau : ce sont

Copyright © 2016 Eyrolles.

Qualité de l'air

La quantité d'air inspirée chaque heure par un adulte représente 0,5 m^3 ; ce volume augmente jusqu'à 9 m^3 s'il est en activité musculaire intense. Au repos, un individu dégage 1,2 kg de vapeur d'eau par jour. Lequel s'ajoute dans le logis à la production de vapeur d'eau globale liée à la moyenne des activités ménagères… soit environ 2,5 kg par jour et par habitant des lieux.

des endroits où nous n'aimons pas nous trouver. On déplacerait volontiers la chaise du mur si nous nous trouvions assis dans un tel endroit (il suffit de couvrir la paroi de meubles, de tissus ou de tableaux : la minuscule lame d'air entre eux et ce mur fera interface).

Lors d'un hiver très froid, si la pièce est bien chauffée, on évitera naturellement de se trouver juste devant une fenêtre, parce qu'on y ressentirait un effet de fraîcheur désagréable.

Les bâtiments mal ventilés souffrent de stratification de l'air. Dans une pièce, la chaleur se concentre près du plafond alors que l'air le plus frais s'accumule au ras du plancher. Une variation de 1 °C sur un mètre de hauteur est jugée inconfortable (température au niveau du visage selon qu'on est assis ou debout). Une différence de 3 °C est considérée comme très gênante, même dans un atelier.

Acoustique

Le confort est aussi lié aux bruits. On les veut amortis dans une salle de séjour et encore plus dans une chambre. Cette caractéristique phonique est favorisée par la structure des fibres végétales ou animales. La multiplication du bois, des livres, des tissus et des étoffes dans un intérieur donnera des sons plus feutrés tandis que les minéraux (pierre, plâtre, etc.) et les métaux répercutent les ondes sonores sans les atténuer. En règle générale, les surfaces lisses ou rigides réverbèrent plus les bruits aériens que les surfaces rainurées ou souples. Un air humide véhicule plus les sons qu'un air sec.

Émetteurs de chauffage

Plus l'apport de chaleur est diffus, plus il est agréable. Un immense radiateur de 6 m^2 qui dégagerait autant de chaleur qu'un émetteur en fonte de 0,5 m^2, donnerait une impression plus douce, plus confortable. Ce qui explique, sans doute, que les personnes qui utilisent des chauffages basse température en font un critère de choix majeur en cas de recherche d'un nouveau logement.

On préfère que l'apport de fraîcheur soit diffus, lui aussi. Mais, s'il fallait choisir, on préférerait qu'il provienne d'en haut. On privilégiera les courants d'air qui passent loin au-dessus de nous et on les dirigera vers des surfaces d'échange (plâtre, terre crue, brique ou même béton) qui ont été humidifiées (cuisine, salle de bains, pot de fleur, fontaine, calade, etc.).

Influences de l'humidité

La sensation de confort ne se limite pas aux températures : l'humidité est prépondérante.

Les odeurs les plus désagréables sont émises par des bactéries. Elles prolifèrent dans les endroits chauds et humides. Les abords des moteurs des machines rafraîchissantes (réfrigérateur, congélateur, climatisation) ou, à une échelle plus microscopique, la condensation dans les gaines électriques favorisent l'implantation à demeure de grandes colonies bactériennes.

Sommes-nous assez vigilants au cheminement des tuyaux en cuivre dans les parois ? Un tuyau d'eau froide, situé dans une salle de bains, va condenser de l'humidité (point de rosée dépassé).

Copyright © 2016 Eyrolles.

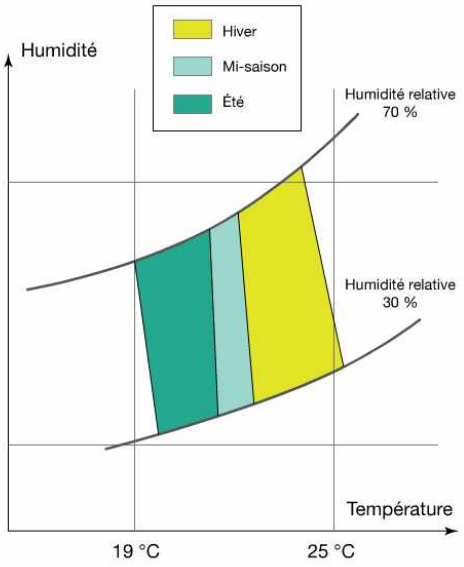
Masse-ressort-masse

Une « paroi qui isole phoniquement » se résume, généralement, à un piège à bruits aériens, composé de deux parois rigides séparées par un isolant souple.
Une fois qu'une onde sonore a pénétré dans ce piège, elle se réverbère sur les faces internes des deux parois rigides, traversant à chaque fois l'isolant qui l'amortit. De plus, en se réverbérant sur une paroi rigide, l'onde sonore lui transmet une partie de son énergie sous la forme d'une vibration, mais l'isolant souple, qui est plaqué contre la paroi rigide, fait office d'amortisseur et l'empêche d'entrer en vibration. Enfin, en désolidarisant les deux parois rigides, on évite qu'une onde vibratoire se transmette par conduction d'une paroi à l'autre.
La masse de la paroi extérieure s'oppose aux sons, le ressort (l'isolant) empêche la paroi extérieure d'entrer en vibration, atténue l'amplitude de l'onde sonore et empêche la seconde paroi rigide d'entrer en vibration. Enfin, la masse de la paroi intérieure s'oppose encore au son résultant.

Pour peu que le tuyau d'eau chaude soit proche et que le matériau qui les sépare ne soit pas hydrofuge, les deux sources nécessaires sont réunies : il y aura des bactéries. Elles peuvent être néfastes pour les habitants, elles s'attaquent aussi au bâtiment. Les plombiers ont pourtant coutume de faire cheminer les tuyaux d'eau chaude et d'eau froide à proximité les uns des autres (ce qui, d'ailleurs, a tendance à tiédir les deux flux).

Un logement qui sent mauvais devient très vite désagréable. Bactéries et moisissures sont responsables de ces gênes. Leur présence résulte généralement de mises en œuvre non conformes des artisans du chantier ou de défauts de conception de l'architecte.

Un air sain semble être un dû. Alors, certains parfument leur intérieur de produits à l'odeur agréable, mais qui contiennent très fréquemment des molécules nocives pour leur santé.



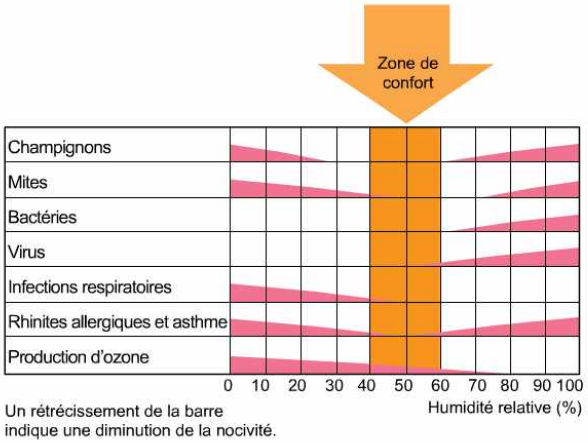
La zone de confort dépend de la saison, ainsi que de la pression de vapeur d'eau dans l'air ambiant (l'humidité relative).

Les mestres modulaient l'humidité des intérieurs grâce aux matériaux de construction. Plâtre, chaux et argile captaient aisément les excès d'humidité, d'autant plus que les parois en terre et pierre laissaient migrer de grandes quantités de vapeur d'eau. L'humidité du radier s'échappait par les sols de terre battue (ou des carrelages sur lit de sable).

Assainisseurs naturels

Depuis vingt ans, toutes les études scientifiques concordent : certaines plantes s'avèrent d'excellents agents de dépollution. On connaît des plantes d'intérieur qui assainissent efficacement l'air. L'aloe vera et le philodendron détruisent 90 % des formaldéhydes, parce que leurs feuilles captent ces gaz tandis que, dans leurs racines, des microorganismes les transforment en nutriments pour la plante. Les azalées se chargent de l'ammoniac, et les chrysanthèmes du trichloréthylène. Les ficus, chlorophytum et autres protègent notre santé : ils brisent les molécules nocives tout en émettant de l'oxygène pur. Les spécialistes estiment que nos intérieurs actuels seraient

Copyright © 2016 Eyrolles.



La santé des habitants dépend de la régulation de l'humidité du logement.

dépollués avec une plante adulte pour 9 m². À cet assainissement de l'air s'ajoute l'absorption bénéfique d'humidité par la terre des pots et donc par les racines de ces végétaux.

Les anciens de « la coloniale » utilisèrent l'essence naturelle de citronnelle à grande échelle. Jusqu'à la Première Guerre mondiale, on employait un autre bactéricide dans toute l'Europe : l'essence de lavande. On en arrosait les tapis et les intérieurs de placards (y compris ceux de la cuisine). Si les termites approchaient, on leur opposait des sels d'alun, puis (encore plus efficace) de l'huile de karité. Contre les fourmis et les insectes rampants, les maîtresses de maison provençales entretenaient un trait continu de chaux qui faisait le tour de tous les ouvrants (y compris la face de la marche de la cuisine). La pièce à vivre était chaulée, elle aussi. La moindre tache, griffure ou rayure sur un mur était recouverte d'un coup de pinceau de blanc de chaux à l'été suivant, jusqu'à disparaître. Ce puissant bactéricide permettait, accessoirement, de vivre dans une pièce lumineuse, saine et nette.

La qualité de l'air revient sur le devant de la scène. Les autorités s'alarment des pollutions constatées dans les intérieurs, ce d'autant plus que nos modes de vie citadins nous amènent à vivre plus

À noter

« Écologie » provient de la combinaison de deux mots grecs : *oikos* (« le foyer, la maison ») et *logos* (« le discours, le savoir »).

de 75 % du temps entre quatre murs. Les règlements vont s'imposer. On tentera d'éviter les molécules carcinogènes ou stérilisantes. L'atmosphère des villes affiche des concentrations particulièrement élevées de fibres fines et de métaux lourds : les filtres nous en protègent mal. Les molécules plus complexes, et en particulier les dérivés du benzène, proviennent surtout de la décoration des intérieurs : les choix de chacun conditionnent la pollution qu'il va respirer.

Ondes électromagnétiques

Certains laboratoires indépendants accusent les antennes des compagnies de téléphone. Dans les intérieurs, les ampoules à basse consommation émettent des ondes, mais ce sont surtout tous les appareils électroniques qui inquiètent. Les scientifiques s'alarment des émissions des bornes wi-fi, des fours à micro-ondes ou des écrans de télévision. Certaines études indiquent que les cellules de notre corps seraient sensibles à des expositions prolongées aux ondes, mais aucune étude n'a encore convaincu un gouvernement de s'attaquer aux émissions d'ondes dans les intérieurs. Par contre, les statistiques semblent indiquer un impact important sur la santé des personnes habitant à proximité de forts émetteurs d'ondes électromagnétiques (lignes à haute tension, transformateurs électriques).

Ondes électriques

Le passage d'ondes électriques dans un support conducteur émet forcément un champ magnétique dont la direction est perpendiculaire au sens du courant. Le bon sens conseille d'éviter les émetteurs d'ondes près des têtes de lit.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Calories

• Par définition, 1 kcal représente l'énergie nécessaire pour élever 1 kg d'eau de 15 °C à 16 °C. La consommation d'un gramme de glucides produit 4,2 kcal, alors que celle d'un gramme de lipides génère 9 kcal.
• Besoin quotidien d'un homme au repos (sommeil) : 1 800 kcal ; activité physique moyenne : 2 700 kcal ; femme allaitante : 2 800 kcal ; activité physique importante : 3 000 kcal pour un homme, mais 2 200 kcal pour une femme.

La thermodynamique

Se chauffer en hiver. En dehors de la chaleur de l'âtre et du captage de l'irradiation d'hiver, on se réchauffait en mangeant.

• Dans le métabolisme humain, la consommation des graisses produit 2,25 fois plus d'énergie que celle des sucres : la maîtresse de maison sortait les fromages et cuisinait ragoûts et pâtisseries. On « faisait » des graisses pour l'hiver.

• Les lois de la thermodynamique s'appliquent parfaitement à l'Homme. Son corps crée de l'énergie grâce aux réactions chimiques qui ont lieu dans ses cellules. Leur carburant provient des aliments, le comburant en est l'oxygène. L'oxydation des aliments produit du CO_2, de l'eau et de l'énergie.

• « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » : l'énergie générée grâce à la digestion est dégagée par les deux plus grandes surfaces d'échange du corps : les alvéoles pulmonaires, via la respiration (convection), et la peau (irradiation).

• Le corps d'une personne au repos émet 60 à 70 % de l'énergie chimique de ses aliments sous forme de chaleur. Donc, plus on mangeait, plus on se réchauffait et plus on chauffait la pièce.

Chez l'homme, la température interne est maintenue à 37 °C. À neutralité thermique (si la température de l'air ambiant se situe entre 21 à 26 °C), l'organisme ne consomme pratiquement pas d'énergie pour maintenir constante sa température interne.

Le corps humain émet environ 120 W d'énergie dans des conditions de neutralité thermique, mais ce chiffre monte à 500 W s'il entretient une activité physique soutenue. La perte de chaleur du corps réchauffe la pièce dans laquelle il se trouve.

Chaque habitant de la maisonnée représente donc une source de chauffage. Entasser toute la famille dans une petite pièce principale en réchauffe l'atmosphère, d'autant plus s'ils sont actifs.

Dans un bureau, 100 % de l'énergie dégagée par les câbles électriques, photocopieurs, ordinateurs, écrans, modem, ampoules électriques, cafetière… est calorifique.

2. La vapeur d'eau émise

Après guerre, la notion de confort était liée à la modernité : il fallait que le logement ait accès à l'eau. L'innovation et l'industrie achevèrent de mettre au point un concept structurel révolutionnaire : la plomberie. Elle permettait d'éviter les corvées d'eau. En ville, les immeubles ou les hôtels modernes affichaient : « eau courante à tous les étages ». Puis ce fut l'eau chaude à volonté qui s'imposa. Enfin, le chauffage modulable du bout des doigts devint la norme.

Notre mode de vie actuel est caractérisé par des émissions de vapeur d'eau jamais vues dans l'histoire de l'humanité. Nous usons sans retenue de l'eau chaude et nos exigences tendent vers une chaleur douillette : les deux ingrédients du développement de colonies de bactéries dans nos intérieurs. Comme si cela ne suffisait pas, les pollutions dues à l'invasion de la chimie synthétique nous empoisonnent à faible dose mais constamment.

Copyright © 2016 Eyrolles.

La solution passe par l'emploi de matières absorbantes minérales (plâtre, chaux), végétales (bois, papier, coton) ou animales (laine), et surtout par la conception de parois très perspirantes (zéolites). Les bactéricides naturels seront utilisés sans retenue (lavande, citronnelle, chaux) ainsi que les plantes d'intérieur dépolluantes.

Les maisons de l'avenir seront peut-être cubiques (?). Il est vraisemblable que les architectes leur concevront des parois qui laisseront passer la vapeur d'eau en très grande quantité tout en restant étanches à l'eau liquide. On peut en imaginer les habitants utilisant des plantes dépolluantes dans leurs décorations.

Peut-être que le modernisme de nos habitats se combinera heureusement avec la verdure de nos intérieurs. Comme si l'écologie commençait dans chaque foyer. Pour le bien de leur santé, pour remédier aux conséquences nocives de notre monde hyperindustrialisé, les habitants soigneront des plantes qui consommeront du CO_2 pour émettre de l'oxygène. Tout un symbole.

La transpiration

Pourquoi 40 °C dans le désert sont pénibles alors que 40 °C dans une forêt tropicale sont insupportables ? Parce que les végétaux de la forêt dégagent beaucoup d'humidité et parce que la sueur s'évapore mieux en milieu sec.

Quand il fait chaud, le corps humain a recours à la sudation. Dans un milieu humide, le point d'évaporation de l'eau s'élève, il faut plus de sueur pour évaporer la même quantité de H_2O que dans la sécheresse d'un désert. Le corps doit donc émettre plus de transpiration dans un milieu humide pour obtenir le même rafraîchissement que dans une ambiance sèche.

Plus l'air est chaud, plus il peut absorber de chaleur. Mais au-delà de 95 % d'humidité relative, toute évaporation de la sueur devient impossible, quelle que soit la température extérieure.

À noter

Le débit d'air nécessaire pour évacuer le CO_2 émis par une personne : 4 à 18 m^3/h ; pour évacuer les odeurs émises par une personne : 18 m^3/h ; pour évacuer la vapeur d'eau émise par une personne : 20 m^3/h. Donc une sonde servant au déclenchement d'une ventilation mécanique centralisée doit être liée à la valeur la plus élevée : le taux de vapeur d'eau dans l'air ambiant.

Dans une pièce où le niveau d'humidité atteint 80 % : dès 22 °C, la « sensation de confort » laisse place à une « sensation de chaleur » ; on ressent une « sensation de chaleur insupportable » à partir de 26 °C. Il faudrait une température moyenne de 18 °C pour que notre sensation de confort physiologique soit satisfaite (mais c'est trop frais pour les besoins physiologiques réels de l'homme).

A contrario, dans une pièce où le taux d'humidité est stabilisé à 50 %, la « sensation de confort » s'étale de 18 °C à 29 °C : elle croise la « ligne de confort maximum » à 22 °C.

La plage de chaleur que privilégient les Occidentaux s'étend de 20 °C à 25 °C : « le confort ». Nous préférons 21 °C dans les pièces à vivre et 24 °C dans les salles d'eau.

L'humidité

La régulation de l'humidité d'un bâtiment conditionne le bien-être et le confort qu'il apporte à ses habitants. En effet, l'humidité favorise, voire provoque ou amplifie, les colonies bactériennes, les odeurs, la portée des bruits, les désordres du bâtiment et les transferts thermiques à travers les parois. Un logement d'aujourd'hui reste un lieu confiné.

Nos modes de vie actuels usent de la vapeur d'eau sans discernement. Deux fois par jour, la plupart

Copyright © 2016 Eyrolles.

de nos salles de bains émettent énormément d'humidité ; les habitants exhalent de la vapeur d'eau en continu ; la cuisine en émet de manière intermittente ; sèche-linge et lave-linge en produisent énormément chaque fois qu'on les utilise.

L'architecte concevra donc une masse poreuse dans le logement (murs, escalier...). Elle pourra stocker l'humidité excessive lors des pics d'émission de vapeur d'eau. Elle libérera cette humidité petit à petit, de façon que le débit de la ventilation puisse l'évacuer. On pourra aussi se servir de cette humidité pour rafraîchir la maisonnée en été.

Le matériau idéal expulserait en continu la vapeur d'eau vers l'extérieur. Il conserverait son stock d'H_2O sous forme de gaz et ne favoriserait pas sa liquéfaction en son sein.

• C'est le cas du bois, de toutes les terres de construction et de bon nombre de minéraux poreux. La chaux (carbonate de calcium) présente l'avantage sur le plâtre (sulfate de calcium) de sécher de manière homogène. Ce qui est très important pour de grands volumes (parois du bâti) l'est beaucoup moins à l'intérieur d'un logement. Les panneaux nervurés (en bois ou en plâtre) ajoutent une qualité phonique à l'habitat.

• Ce n'est pas le cas des ciments courants (capillarité), sauf si l'on emploie de la zéolite en lieu de sable. Ce qui aurait l'avantage de nécessiter moins de ciment par tonne construite, puisque l'adhésion substrat-liant est plus forte avec de la zéolite qu'avec du sable. Accessoirement, la zéolite coûte nettement moins cher que le ciment.

Les gaz se déplacent du froid vers le chaud ou, plus précisément, des fortes pressions vers les basses pressions.

La ventilation peut jouer sur les différences de pression entre l'atmosphère interne au logement et celle à l'extérieur du bâti. L'électronique permet de la moduler en fonction d'un thermomètre.

Les COV

Les composés organiques volatils (COV) regroupent un très grand nombre de molécules de propriétés physico-chimiques très différentes. Ce sont essentiellement des solvants utilisés en chimie, pharmacie, cosmétique, traitement de surface, imprimerie, etc... Des plastifiants, des composés soufrés et azotés susceptibles d'induire des nuisances olfactives, des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques. Compte tenu de cette diversité, des définitions ont été proposées. La directive européenne 1999/13/CE du 11 mars 1999 définit les COV comme étant « tout composé organique ayant une pression de vapeur saturante de 0.01kPA ou plus à une température de 293.15 K, ou ayant une volatilité correspondant dans les conditions d'utilisations particulières. » La prise en compte des risques générés par les COV devient mondiale.

Si la pression de l'air à l'intérieur du bâti est supérieure à celle de l'air extérieur, les gaz vont avoir tendance à se déplacer à travers les parois vers leur face externe. La vapeur d'eau va donc s'évaporer sur la face extérieure de la maison. Elle y provoquera un rafraîchissement d'autant plus important qu'elle sera à l'ombre et que les constituants des parois (structure, isolants) seront chaque fois plus perméables à la vapeur d'eau (de l'intérieur vers l'extérieur du mur). Les polluants extérieurs gazeux (COV, benzéniques, etc.) ne pénétreront pas les murs et il y aura moins de poussière dans le logement.

Une légère surpression par rapport à l'extérieur suppose une ventilation réglable. Une hygroB peut stabiliser l'humidité relative du logement à 50 %. À condition de laisser la gestion des pics d'humidité à une masse poreuse, les appareils de ventilation actuels permettent d'améliorer considérablement la « sensation de confort ». Si ladite masse poreuse est constituée d'un matériau lourd propice à amortir les températures, tous les ingrédients structurels sont réunis pour obtenir un habitat sain et confortable. Ce que ne manqueront pas d'apprécier

Copyright © 2016 Eyrolles.

tous les habitants d'un tel logement, propriétaire après propriétaire, durant des lustres.

Le transfert d'humidité à travers une paroi

Ce transfert résulte de trois phénomènes physiques :

- la diffusion d'humidité par différence de la pression partielle de la vapeur d'eau entre l'extérieur (Ppe) et l'intérieur du logement (Ppi) ;
- le transfert de l'humidité adsorbée par la paroi (surtout par ses ponts hydriques) ;
- le transport de vapeur d'eau par capillarité.

Diffusion d'humidité par différence de la pression partielle de la vapeur d'eau entre l'extérieur et l'intérieur du logement. Si la pression de vapeur d'eau est plus forte à l'extérieur qu'à l'intérieur du logis, cette différence de pression tend à pousser les molécules d'eau à travers la paroi de l'extérieur vers l'intérieur. Si les « pores » du matériau constituant l'extérieur de la paroi sont de plus grands diamètres que ceux du matériau constituant le côté intérieur de la paroi, l'humidité aura tendance à s'accumuler à l'intérieur de la paroi. Auquel cas, la vapeur d'eau aura tendance à condenser du côté le plus froid de la paroi à mesure que la quantité de vapeur/température s'approche du point de rosée. Durant les mois chauds, le point de rosée ne sera jamais atteint. Durant les mois froids, en cas d'ITE (isolation thermique par l'extérieur), il peut y avoir condensation au sein de l'isolant du côté extérieur de la paroi (les isolants capables d'absorber de l'eau ne seront pas affectés) En cas d'ITI (isolation thermique par l'intérieur), la condensation a systématiquement lieu à l'interface entre le mur porteur et l'isolant.

Transfert de l'humidité adsorbée par la paroi (surtout par ses ponts hydriques). Tous les matériaux non hydrophobes (presque tous les matériaux de construction) contiennent une certaine quantité d'eau (sous forme liquide ou sous forme de vapeur). À partir d'une humidité relative de 60 %, il se forme un film d'eau qui devient mobile et tend à s'équilibrer en migrant vers les endroits où le film est le plus fin. Dans un matériau, les diffusions de vapeur et d'eau liquide ont généralement tendance à se déplacer en sens inverse. Une paroi qui est composée de plusieurs matériaux différents (densité, capacité d'absorption de chaque matériau, etc.) multiplie les interfaces et tend à interdire la continuité de ces films d'eau, d'autant plus que ces matériaux sont peu denses. Notez qu'une lame d'air constitue un rupteur de ce film d'eau.

Poussière d'amiante naturelle

Dans la région de Bastia, le vent balaye des dépôts d'amiante naturels qui affleurent le sol. La ville reçoit cette pollution. Dans un bureau de la médecine du travail, on a testé de nouveaux matériels de mesure. Ensuite, on a fait les mêmes tests dans l'appartement du dessus. Moquettes et rideaux meublaient l'endroit. Les nouveaux appareils de mesure ont été unanimes : le taux d'amiante y était neuf fois supérieur à celui des bureaux de l'administration !

- Dans les bureaux, les parois étaient lisses et lavées à l'eau, celle-ci fixait et emportait la poussière. La ventilation ne rencontrait pas d'obstacle et renouvelait parfaitement l'air. L'amiante était donc régulièrement évacué des lieux.
- Dans l'appartement du dessus, tissus et moquette se comportaient comme des pièges à poussière. Les minuscules échardes d'amiante, apportées par les courants d'air, se fichaient au plus profond des fibres. Les textiles les isolaient de chaque mouvement d'air qui aurait pu les emporter, même ceux générés par un aspirateur à pleine puissance. La ventilation était donc inefficace. La poussière d'amiante imprégnait l'appartement.

Entre « le bureau sain » et « l'appartement cancérigène », il n'y avait que quelques mètres d'altitude. La seule justification d'un taux d'amiante neuf fois supérieur résidait dans les tissus qui en stockaient la poussière (concentrations élevées dans le salon et les chambres, mais faibles dans la salle d'eau et la cuisine).

Copyright © 2016 Eyrolles.

Transport de vapeur d'eau par capillarité. À des humidités relatives supérieures à 80 %, des capillaires commencent à se remplir d'eau : du fait de la forme et du diamètre des capillaires (et de la tension superficielle de l'eau), les matériaux riches en capillaires (béton, etc.) tendent à véhiculer de l'eau en leur sein. Notez qu'il n'existe pas d'isolant riche en capillaires. Le tableau suivant donne les ordres de grandeur de la quantité d'eau transférable, par seconde, à travers trois matériaux.

	Été		Hiver	
Eau	vapeur	liquide	vapeur	liquide
Béton	1	1	0,1	1,5
Brique	15	1 000	1	2 500
Laine minérale	150	0	15	0

Données calculées avec des valeurs climatiques moyennes et une humidité intérieure (minimale) figée à 40 %.

Pathologie des vieilles demeures

Aujourd'hui, les maisons datant d'avant 1850 pâtissent souvent d'humidité dans leurs parois. Ces maisons avaient été construites avec un sol en terre battue. Celles qui l'ont conservé affichent des murs dont la face interne est toujours sèche au toucher.

Pourquoi cette différence ?

Les vieilles demeures qui connaissent aujourd'hui des murs humides ont toutes été rénovées. Le sol en terre battue du rez-de-chaussée a été remplacé par un sol étanche : on a creusé un mètre de terre, posé un épais lit de galets (radier), couvert d'un film plastique continu, coulé une dalle de béton ferraillée et présenté le tout sous un habillage en harmonie avec la décoration de l'intérieur.

Ce film plastique constitue une barrière à la remontée d'humidité. Aussi, une fois la « dalle de plancher bas » coulée, tout a changé : le sol était humide, il devint sec ; les murs étaient secs, ils devinrent humides.

En transformant la surface d'échange, on a cassé le système bioclimatique. L'humidité contenue dans le radier ne peut plus s'évacuer par le plancher. Les éléments de la maison les plus enfoncés dans la terre sont les fondations : elles font en quelque sorte office de mèches (ponts hydriques). Elles captent les excédents d'humidité après les pluies. Des fondations, cette humidité se transmet aux murs. La chaux homogénéifiant les concentrations de vapeur d'eau en son sein, elle répartit cette surabondance d'humidité dans toutes les parois.

Si la terre est très humide, la seule surface d'échange des murs s'avère insuffisante : il manque la surface d'évaporation de l'intégralité des planchers bas du bâtiment pour évacuer l'humidité du radier captée par les fondations. Les murs restent donc humides.

Dans certaines zones argileuses, la terre insuffisamment asséchée par les parois accumule des molécules d'eau sous la maison. Après chaque pluie, l'argile, protégée par les fondations, s'y gonfle d'humidité. Ce désordre est amplifié lorsque les façades ont été couvertes d'un enduit étanche : la surface par laquelle la vapeur d'eau aurait pu être échangée avec l'air extérieur en est diminuée d'autant. Des molécules d'H_2O finissent par s'accumuler contre la barrière étanche, elles vont se condenser sous forme d'eau aux premiers froids et décoller enduits ou peintures (cloques). Seuls les enduits à base de chaux conviennent aux murs bâtis à la chaux.

Solution à long terme : la quantité de vapeur d'eau qui peut être évacuée par le plancher bas en terre battue des maisons varie considérablement selon l'humidité ambiante et la température du moment. 0,06 litre d'eau par mètre carré et par heure semble être une approximation acceptable de l'évaporation (renouvellement d'air de 5 vol./h, à 50 % HR et 25 °C), soit 52 tonnes d'eau par an pour une maison de 100 m^2 au sol. Cette masse correspond à celle qui est bue par un platane et un arbre fruitier.

Solution à court terme : il faut faire tomber enduits et peintures étanches pour conférer aux parois la plus grande surface possible d'échange de vapeur d'eau. Le nouvel enduit sera fait à la chaux. On créera toutes les tranchées drainantes nécessaires pour éviter l'écoulement d'eau à proximité des fondations.

Copyright © 2016 Eyrolles.

11| Le vent

Les vents dominants les plus puissants de France se concentrent sur le Midi. Les constructeurs provençaux avaient choisi de ne pas s'y opposer. Ils ont élaboré de nombreuses adaptations à la puissance d'Éole. On pourrait copier la plupart d'entre elles. La carte des vents en France isole deux régions. Ce sont les deux seuls triangles dans lesquels le vent soufflerait en moyenne à plus de 27 km/h (7,5 m/s). À lire les fichiers météo, il y est beaucoup plus puissant : il dépasse régulièrement les 90 km/h. Claude Nougaro parlait de « vent de diable et vent d'ange ». Par sa force et sa fréquence, il a conditionné l'architecture et l'environnement du Languedoc et de la vallée du Rhône.

Si on ajoute au Midi de la France le Sud de l'Ibérie, c'est dans ces deux régions que le vent souffle avec le plus de puissance, dans toute l'Europe : les toits de tuiles canal y sont presque plats : 18°. Chaque tuile étant posée sur celle qui est en aval, les extrémités aval des tuiles font légèrement saillie :

Les régions de France qui connaissent les vents les plus violents se trouvent dans l'arrière-pays méditerranéen : le mistral souffle un jour sur trois au moins. C'est le pays des moulins à vent chers à Daudet. © Shutterstock/ Shutterschock.

elles créent une succession infinie de minuscules remous sur lesquels glisse le vent (comme l'eau glisse sur une peau de requin).

1. Stratégie d'évitement

Une région en particulier subit plus le mistral que les autres : la Camargue. Les arbres y sont rares. Le vent souffle librement sur l'absence de relief. Les maisons ont donc été édifiées pour s'en protéger.

En deux points singuliers, le vent fragilise le toit. Lorsque le mistral rencontre l'arrondi incliné du nord de la maison, il s'accélère légèrement (effet Venturi). La masse d'air comprimée par l'obstacle se sépare en filets qui longent les faces est et ouest mais aussi le long du toit (à l'horizontale).

Lorsque le filet qui est monté en s'appuyant sur la pente nord a dépassé le bord supérieur du toit, il crée une dépression donc des turbulences qui ont

Copyright © 2016 Eyrolles.

La face de la maison orientée au nord est ronde, les murs est et ouest suivent exactement l'orientation du vent, la faîtière maçonnée n'offre pas de prise. Le mistral peut souffler en rafales, il glisse sur les maisons de Camargue.

Cette croix protège le toit.

• Sa barre horizontale crée deux faisceaux de turbulence qui s'annulent partiellement.

• Sa barre verticale scinde le filet d'air ascendant en deux, participant à protéger le « pignon » nord de la faîtière.

En été, ces piquets portent une ombrière en canisses.

tendance à arracher la pointe supérieure du toit. C'est pourquoi nos anciens y plaçaient une croix inclinée. Le filet d'air au contact avec la pente du toit va rencontrer la barre horizontale de la croix. Il va se séparer à nouveau : un filet au-dessus de la croix et un autre en dessous. Celui du dessous va remplir la zone de basse pression avec ses remous. Celui du dessus n'a plus tendance à arracher le toit puisqu'il n'y a plus de zone de basse pression à cet endroit. L'effet de succion sur la pointe nord du toit est pratiquement divisé par deux.

Là où le toit se termine, contre la façade sud, il faut absolument maçonner. Faute de quoi, la rive serait arrachée à la première rafale. Si on construit plus épais cet amas de mortier, la lame d'air qui glisse sur le toit est projetée un peu plus loin. Une maçonnerie solide à cet endroit permet d'agrandir la zone abritée du vent devant la façade sud du bâtiment.

Les habitants de Camargue ont utilisé la forme la plus efficace pour créer un espace, devant leurs maisons, qui ne subit pas les remous du vent. Dans cette zone abritée, ils construisent parfois un auvent léger (qui ne sera jamais arraché par le mistral).

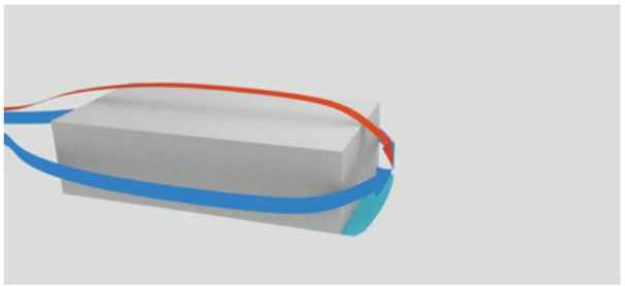
Ailleurs dans le monde

Dans deux autres régions très ventées du monde : la Mongolie (yourtes) et les grandes plaines de l'Ouest américain (tepee), la tactique constructive employée a été similaire : une forme arrondie face au vent et des façades parfaitement lisses. Le vent épouse la forme arrondie malgré sa puissance, puis glisse le long des façades. Ces bâtiments ne s'opposent pas au vent : leurs formes évitent sa violence.

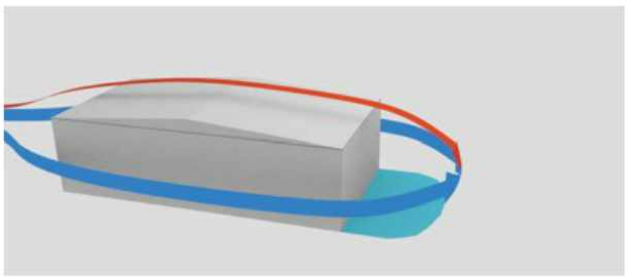
Copyright © 2016 Eyrolles.

Zone abritée du vent par un bâtiment

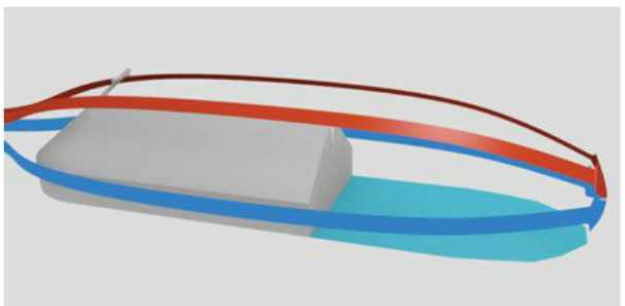
On ne trouve cette forme très particulière d'habitat qu'en Camargue. Plus au Nord, dans la vallée du Rhône, les données climatiques ne sont pas exactement les mêmes. Plus on s'éloigne de l'effet tempérant dû à la masse thermique de la Méditerranée et plus les maisons se font hautes et étroites. Les mestres ont donc mis en œuvre d'autres solutions.



Hangar : pente du toit = 0. Façade nord verticale et haute. Surface de la zone abritée du vent = 0,3.



Maison provençale : pente du toit = 18°. Façade nord verticale et basse. Surface de la zone abritée = 1.



Maison camarguaise : faîtière dans le sens du vent. Façade nord arrondie, façades est et ouest très basses. Surface de la zone abritée = 3.

La façade sud s'élevait haute pour capter le rayonnement solaire d'été. La façade nord avait donc les mêmes proportions. Certains firent descendre des toits très bas pour que le mistral glisse dessus. Mais ces celliers étaient précédés d'une fenêtre. Le mistral s'y serait engouffré de toute sa violence si les habitants n'avaient compris comment fonctionnaient ses remous.

2. Frises sur faîtières

En 1209, la ville de Béziers fut dévastée et ses habitants massacrés lors de la croisade des Albigeois menée par Arnaud Amaury.

La cathédrale Saint-Nazaire fut abîmée par les événements. On l'entoura d'une palissade pour procéder aux travaux. Quarante ans plus tard elle était réparée, on démonta l'échafaudage qui protégeait le lieu saint. En haut de ses murs, une surprise attendait les habitants : des créneaux entouraient un chemin de ronde. Au-dessus de la magnifique Grande Rosace, l'église catholique avait construit une forteresse. Il fallait impressionner le mécréant, s'en protéger, aussi.

Il y eut du vent. Rien n'advint. La cathédrale ne tomba pas. Dix ans passèrent. Les tempêtes du Languedoc balayèrent la ville. Le bâtiment restait debout. Les compagnons venaient de loin voir le prodige. On réfléchit, on se questionna, on releva des mesures : on décida que c'étaient les créneaux qui la protégeaient du vent. Pour être franc : aucun ne comprenait pourquoi. Mais d'Irlande jusqu'en Allemagne, on commença à créneler le haut des murs des cathédrales. Certains architectes tentèrent d'arrondir un peu les formes pour donner une allure moins guerrière à ces monuments religieux. D'autres les firent tailler en forme de fleurs de lys, de demi-lunes, ou de pot-à-feux.

C'est qu'il y avait urgence. Le monde chrétien avait lancé des chantiers pharaoniques : il faisait construire les bâtiments les plus hauts d'Europe.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Créneaux au haut de la cathédrale de Béziers. © Fotolia / M. Dalach

Les rois et les catholiques avaient donné des sommes faramineuses. On inaugurait une cathédrale, dans la joie et la liesse. Presqu'à chaque fois, dans les dix ans, un pan de l'édifice s'écroulait. Toujours après qu'il y avait eu grand vent. Les épiscopats n'osaient plus lancer de nouveaux projets. Les mauvaises langues parlaient de diableries. L'Église avait voulu construire des édifices gigantesques à sa gloire et... le peuple des artisans faisait appel à la sorcellerie ! On trouvait des croix qui avaient été tracées avec du sang de poule sur la pierre des bâtiments, en catimini, pour conjurer le mauvais sort. Rien n'y faisait : un mur s'écroulait qui était toujours celui masqué au vent froid et humide, un pan de toit le suivait et une partie de la voûte chutait... éventuellement sur des fidèles en prière.

Les compagnons qui cherchaient des solutions, constatèrent que les cathédrales dont les murs avaient étés crénelés ne tombaient pas. On reproduisit ce crénelage sur les chapiteaux, entre les tours, et partout où soufflait le vent malin. Les faîtières des maisons hautes recommencèrent à s'orner de crêtes.

Jusqu'au XII^{e} siècle, les couvreurs utilisaient des tuiles vernissées pour réaliser le faîte des toits. La surface lisse réduisait la prise au vent. Dans les couloirs venteux du Nord de l'Italie, les Étrusques couronnaient leurs maisons de motifs verticaux en terre cuite. Certaines tuiles faîtières romanes présentaient de petites crêtes (des « boutons »). Dès le XIII^{e} siècle, les maisons riches, dans les zones ventées, ornaient leurs tuiles faîtières d'appendices qui pouvaient mesurer jusqu'à quarante centimètres de haut. Les motifs, largement ajourés, permettaient de diviser la puissance de la lame d'air qui passait au-dessus de la faîtière.

Mais ces « faîtières à crêtes » occupaient beaucoup de place dans les fours. Elles cassaient souvent à la cuisson. Très onéreuses, elles étaient réservées à une clientèle fortunée.

Lorsque le vent bute sur un obstacle aussi important qu'une cathédrale, la lame d'air ne peut s'échapper vers le sol. Donc elle se divise essentiellement en un filet qui monte et un filet qui va sur chaque côté. En montant, elle rencontre la lame d'air qui arrivait naturellement à la hauteur du haut du mur. L'air y est donc comprimé.

Un touriste qui marche sur la Grande Muraille, un chemin de ronde ou qui visite les tours de Notre-Dame de Paris, ressent toujours un vent puissant. Beaucoup plus violent que celui qu'il perçoit au pied de l'édifice. Les compagnons savaient cela. Leurs connaissances ancestrales leur avaient fait prévoir le choc du vent sur l'édifice. Leurs constructions répartissaient les forces, en compression, jusqu'aux arcs-boutants. Le poids considérable des maçonneries et des toitures résistait, sans dommage, au choc d'une lame d'air, quand bien même le vent fût violent. Ce qu'ils ne savaient

Copyright © 2016 Eyrolles.

Ces deux toits côte à côte subissent tous deux les mêmes vents. Le toit de droite, qui a des ergots sur la faîtière, est en parfait état. Le second a été garni de multiples pierres plates pour retenir les tuiles qui avaient tendance à s'envoler.

pas, c'est que le vent appuie sur la face du toit avec une force trois fois moins importante que celle qui tend à arracher la structure de l'autre côté (celui protégé du vent). Lorsque le mistral souffle, en Provence, il vient du nord. Les tuiles qu'il fait s'envoler se trouvent sur les versants sud des toits des maisons. Quand, par extraordinaire, les tempêtes viennent de Méditerranée, ce sont les pentes au nord qui sont arrachées.

3. Le vent arrache ?

Supposons un mur sur une lande parfaitement plane. Le vent souffle. S'il n'y a pas d'obstacle, les strates d'air se déplacent parallèlement au sol. Le vent rencontre le mur. Une bonne part de la lame d'air inférieure est obligée de monter. Elle s'additionne à la lame d'air qui arrivait juste au niveau du haut du mur. Il y a surpression (plus d'air à faire circuler dans le même espace). Une fois l'obstacle franchi, juste derrière le mur, le phénomène s'inverse : les lames d'air vont disposer de plus d'espace et la pression va baisser proportionnellement (c'est une dépression). Le principe de Bernoulli montre que la vitesse du fluide (l'air) augmente lorsque la pression exercée sur le fluide diminue. Donc le vent s'accélère fortement.

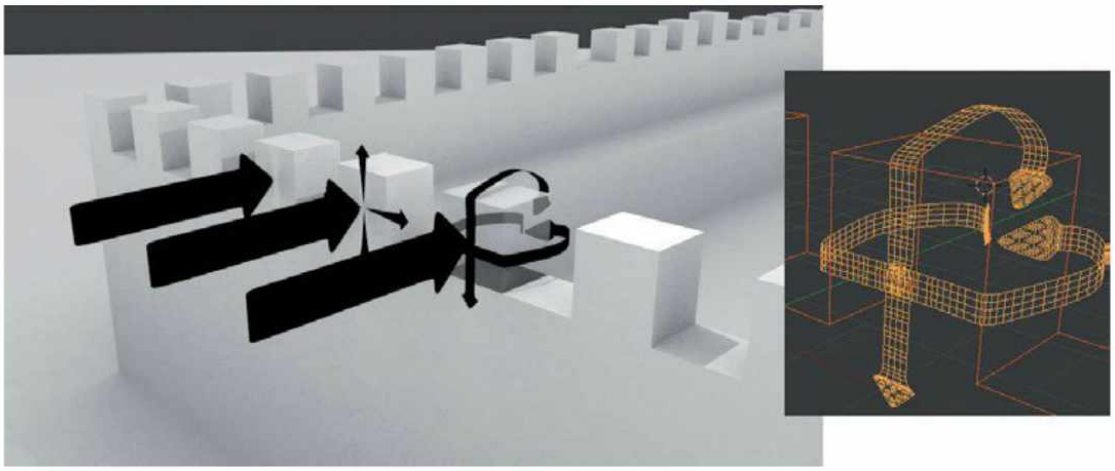
C'est exactement le phénomène qui permet à un avion de voler : lorsque l'avion avance, on peut considérer que l'air dans lequel il pénètre est un vent par rapport à lui. Sous son aile, il y a une surpression (l'air est comprimé). Sur son aile, nettement plus puissante, il y a une dépression qui va aspirer l'aile vers le haut. Un aéronef en vol est donc suspendu dans l'atmosphère plus qu'il ne s'appuie dessus.

Puisque derrière le mur, l'air n'a pas d'appui, il va créer des turbulences. Il y a donc des filets d'air qui, une fois le mur dépassé, vont se diriger vers l'arrière dudit mur. Ils sont alors dans une zone de très faible pression, donc ils vont très vite.

Des pierres sur les toits ?

Sur les toits de Provence, au lieu des faîtières à crêtes, les habitants ont recours à une parade plus récente : pour empêcher leurs tuiles de s'envoler, ils posent des pierres plates sur la toiture. Or, selon la vitesse du mistral, la zone de plus forte dépression se déplace sur le toit. Les pierres nécessaires sont donc nombreuses. La charpente avait été calculée pour une masse équivalente du versant sud et du versant nord du toit. Ces pierres fatiguent donc les fermes de bois. Heureusement, les zones où le vent a le plus tendance à arracher les tuiles se situent sur des points porteurs : le bas du toit et le pourtour des cheminées. Au milieu du Rhône, sur l'île de la Bartelasse, une rafale de mistral plus violente qu'à l'habitude cassa une branche qui balaya la toiture. Trois pierres plates d'une dizaine de kilos chacune se trouvèrent poussées, elles tombèrent dix mètres plus bas. Il était cinq heures du matin. Il n'y eut pas de blessé, simplement une table brisée. Les « estrangers » britanniques ou belges demandent de plus en plus souvent aux couvreurs locaux de coller quelques pierres sombres sur leurs tuiles : « Ça fait tellement provençal ! »

Copyright © 2016 Eyrolles.



Les flux latéraux, autour du créneau, ont tendance à s'annuler. Si le créneau est percé d'une archère et que le vent est peu rapide, les flux latéraux et le flux supérieur se rencontreront plus loin, après le chemin de ronde (et auront tendance à s'annuler).

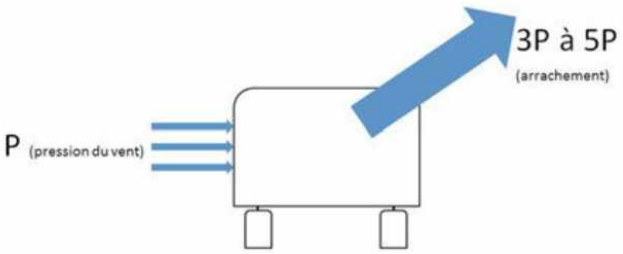
Si un mur mesure vingt mètres de hauteur et si le vent est à 70 km/h, alors la lame d'air qui a rencontré le mur monte le long de celui-ci à une vitesse proche de 95 km/h ; au dos du mur, les turbulences atteindront environ 120 km/h.

Supposons maintenant que ce mur soit épais. Lorsque la lame d'air A qui monte le long du mur (à 95 km/h) rencontre la lame d'air B qui arrivait à la hauteur du haut du mur (à 70 km/h), la lame d'air A va pousser la lame d'air B vers le haut. Le vent résultant ne va donc pas épouser exactement le haut du mur : il va passer un peu plus haut. En conséquence, au ras du haut du mur, et sur toute l'épaisseur de la paroi, va se former une forte dépression. Cette dépression va tendre à aspirer (succion) le mur vers le haut, comme pour le déterrer.

Pourquoi les créneaux empêchent-ils les cathédrales de tomber ?

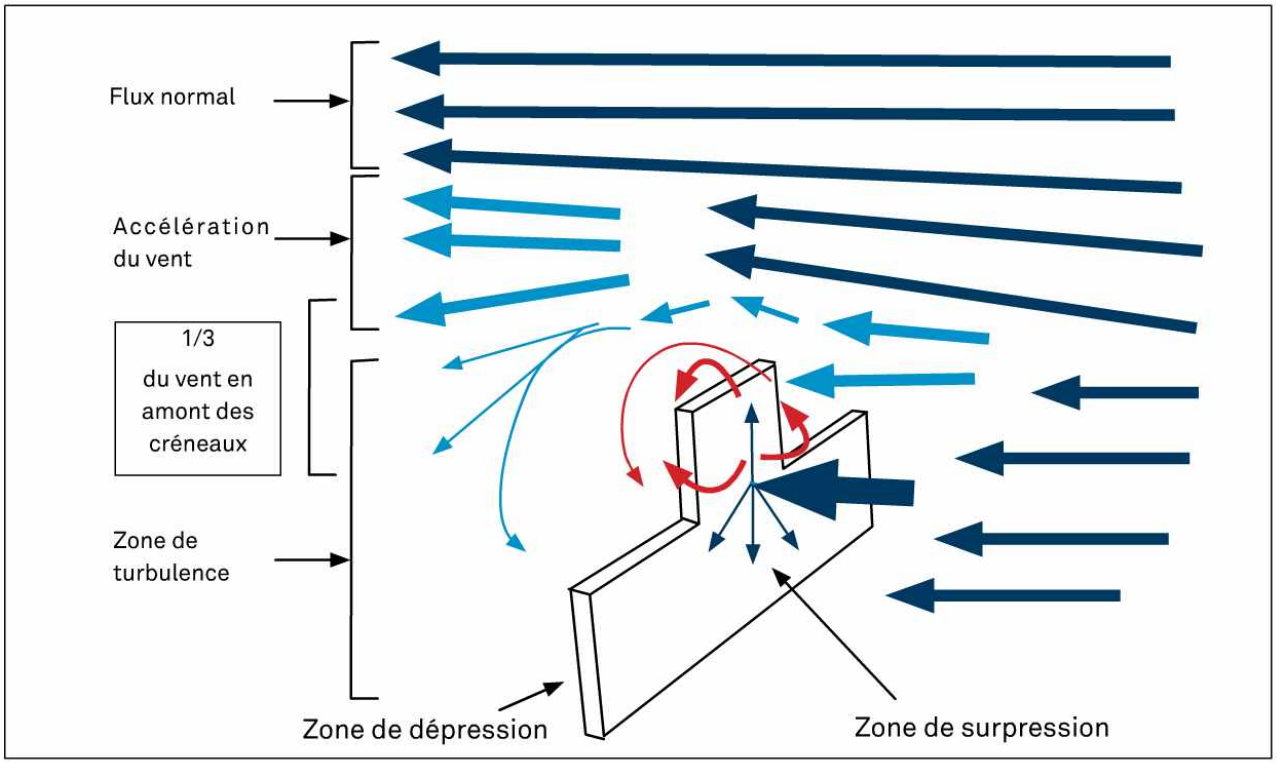
On peut se représenter des créneaux comme une moitié de murs pleins et une moitié d'ouvertures. À chaque fois qu'il rencontre une partie murée, le vent s'y divise surtout en un flux vers le haut et un flux de chaque côté. Juste après la partie murée, les filets qui sont allés sur les côtés rencontrent, dans la dépression qu'il y a derrière le mur, la turbulence qui vient du dessus. En d'autres termes, au lieu que 100 % du vent crée des turbulences et arrache ce qu'il y a en bas, derrière le mur... une bonne part de cette énergie tend, horizontalement, à arracher ce qu'il y a derrière le créneau. L'effet de succion horizontal ne tend pas à soulever le toit.

Derrière chaque créneau arrivent des turbulences horizontales de la droite et de la gauche, ainsi que du haut. Il en résulte un magma de turbulences (dont certaines s'annulent). Le filet de vent qui est



Le vent tend à aspirer le toit. Ce fut le problème que les compagnons bâtisseurs de cathédrales ne savaient pas évaluer. Tout l'équilibre des répartitions des poids entre les différents piliers et arcs-boutants des cathédrales s'en trouvait déstabilisé. Les murs qui s'écroulaient étaient toujours du côté protégé du vent. C'était justement le côté où la dépression exerçait son aspiration vers le haut.

Copyright © 2016 Eyrolles.



Réaction du flux du vent sur un créneau.

Si le vent souffle doucement, il passe entre les trous des fleurs de lys et chacun des flux latéraux tend à annuler son opposé. Si le vent souffle plus fort, les turbulences bouchent chacun des trous de chaque motif, mais les flux latéraux à chaque motif vont avoir tendance à s'annuler. Si une rafale encore plus puissante souffle, les espaces entre les motifs vont être à peu près saturés par les turbulences (protégeant la faîtière de l'arrachement), mais les espaces entre les pointes des motifs les plus hauts vont générer des flux latéraux, donc des turbulences sur lesquelles glissera le vent... protégeant tout le haut de la toiture.

passé entre les créneaux est relativement étroit. Sa puissance est donc moindre. Il va tout de même tendre à arracher le toit.

Les compagnons commencèrent à comprendre ce mécanisme. Ils constatèrent d'abord que les créneaux présentaient une alternance de pleins et de vides. Ils pensèrent donc que la force d'arrachement du vent avait été divisée par deux. Ce n'était pas si simple. Le rapport entre l'espacement entre chaque créneau et la hauteur des parties murées aurait dû être pris en compte. Pour simplifier, on peut considérer que le phénomène d'arrachement du vent est diminué d'un tiers.

Les vents violents, par leur force de succion, ne suffisaient plus à déstabiliser l'équilibre des masses de la cathédrale.

Schématiquement, le flux qui descend s'oppose aux flux qui sont en train de monter le long de la

Copyright © 2016 Eyrolles.

paroi et il est annulé. Les deux flux latéraux se retrouvent derrière le créneau et sont attirés par la basse pression qui se trouve sur la face arrière du créneau ; ils se contrarient l'un l'autre et leur rencontre crée une turbulence importante. Le flux vertical, poussé par le vent, dépasse le sommet du créneau et plonge derrière après avoir glissé sur la turbulence qui le freine.

Quelqu'un, un historien sans doute, a dû s'en souvenir : les Étrusques avaient aussi rencontré le problème des vents violents qui arrachaient les toits. Ils avaient inventé des tuiles très particulières qu'ils plaçaient sur le faîte de leurs édifices. Ces tuiles étaient surmontées de sortes de crêtes, les motifs en étaient variés, ils répondaient au même besoin. Alors le Moyen Âge se mit à les reproduire. On en couronna le toit des maisons de qualité. Ce fut très efficace.

Malheureusement, son usage est perdu. On a oublié cette solution technique. Les rares faîtières de ce type qui subsistent ont souvent été produites avant la Première Guerre mondiale. Les couvreurs d'aujourd'hui n'en ont plus la demande. Leurs pères en posaient encore quelques-unes.

Les tuiliers ne fabriquent plus guère de ces faîtières dont ils ont oublié l'utilité. Elles sont commercialisées en tant que pièces décoratives. Leurs meilleures ventes se font aux États-Unis. Le plus demandé est le modèle « fleur de lys », il sert d'ornement aux toits de faux châteaux du Texas ou de l'Oregon.

4. Fenêtre nord

Les celliers des mas provençaux étaient considérés comme des zones de stockage. On s'y déplaçait, on y était en mouvement : on n'y allait pas pour se prélasser ni pour y effectuer un travail de précision. Le besoin d'éclairage était donc limité dans cette pièce. Une petite fenêtre suffisait. Elle se trouvait nécessairement orientée au nord, vers

Fenestreau au nord d'une maison provençale. L'huisserie se trouve « au nu intérieur » (le plus à l'intérieur possible) de la paroi. Le cadre de la fenêtre mesure 50 cm de largeur, il se trouve 52 cm à l'intérieur du mur : la fenêtre est « moins large que profonde ». À partir de 50 km/h, le vent ne touche plus la fenêtre.

le mistral. Il aurait fallu qu'un volume d'air suffisant puisse s'engouffrer par cette ouverture pour permettre le passage des volumes d'air nécessaires à la ventilation de la pièce principale. Il aurait aussi fallu que les violentes rafales du mistral soient empêchées d'y pénétrer. En d'autres termes, les mestres provençaux devaient trouver un moyen de laisser passer les souffles agréables mais pas les bourrasques. Ils essayèrent différentes solutions jusqu'à n'en retenir qu'une seule : la meilleure. Ils la reproduisirent à l'envi durant des siècles, inchangée : il suffisait que l'ouverture de la fenêtre soit moins large qu'elle n'était profonde dans le mur. Les murs mesurant une bonne cinquantaine de centimètres d'épaisseur et le cadre d'une fenêtre représentant environ 5 cm de largeur, même si le vitrage de ladite fenêtre se trouvait à l'extrémité de l'embrasement, c'est-à-dire au droit du mur intérieur, le vitrage de la fenêtre dépassait rarement 40 cm de large.

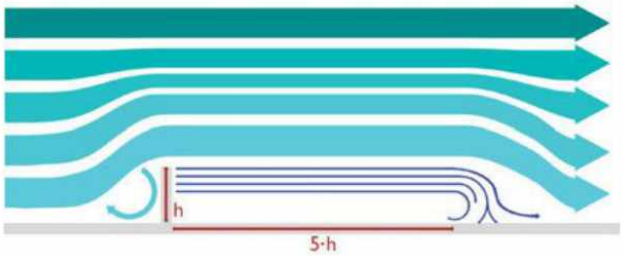
On remarque aussi que lorsque les arbres qui protégeaient le nord des vieux bâtiments ont dû être abattus, l'ouverture de certaines fenêtres a été rétrécie (souvent en ajoutant l'arrondi d'une tuile de chaque côté).

Copyright © 2016 Eyrolles.

Dimensions d'une fenêtre au nord

Lorsque le mur nord d'un bâtiment comporte des fenêtres, il faut en reculer le vitrage jusqu'à l'aplomb du mur intérieur pour qu'elles profitent des remous causés par le vent sur la paroi. Si elles ont été conçues légèrement plus larges que profondes, une astuce consiste à placer une moustiquaire au ras du bord extérieur de l'ouverture. La moustiquaire protégera la fenêtre des rafales du mistral, mais elle diminuera considérablement la luminosité qui passera par cette fenêtre. Les fenêtres au nord sont moins larges que le mur n'est profond. Plus le vent forcit, plus la zone de turbulence grandit. À partir de 50 km/h, le vent ne touche plus la fenêtre.

Mur percé protégeant la zone de travail des excès du mistral (plaine d'Orange, fin du XIX^{e} siècle)



Au dos du mur, le fin filet de vent trouve une zone calme. Il se dilate donc il freine (par le mécanisme exactement opposé à celui de l'effet Venturi). Ce souffle lent est tout à fait acceptable pour un travailleur en mouvement, il ne lui cause aucune gêne. Cette masse d'air lente occupe le dos du mur, il n'y a donc pas là de basses pressions propices à attirer des turbulences qui viendraient de la lame d'air accélérée au haut du mur. Il en résulte que sur 20 mètres, soit 5 fois la hauteur du mur, l'endroit est suffisamment abrité du vent violent pour que la flamme d'un briquet vacille à peine.

Pourquoi ces fenêtres étroites se moquent-elles des violences d'Éole ?

À chaque bord de la fenêtre arrivent des remous générés par les lames d'air qui se sont écrasées sur le mur nord du bâtiment. Plus le mistral souffle fort, plus ces remous sont importants. Les logiciels aérauliques montrent que, dès que le souffle dépasse 50 km/h (une quinzaine de m/s), les turbulences finissent par couvrir l'ouverture.La vitre ne reçoit donc le vent que s'il est peu violent. Si le mistral se fâche et lâche ses rafales assassines, alors il ne touche jamais la partie vitrée. D'ailleurs dans la vallée du Rhône, là où il s'engouffre avec le plus de puissance, les toiles d'araignée qui ornent les fenêtres nord sont toujours là. Dans les bâtiments abandonnés, leurs filaments ont accumulé une poussière sombre, depuis des dizaines d'années, qui les souligne encore plus. Jamais aucune rafale de mistral ne les a arrachées.

Les mestres n'avaient évidemment aucune notion de mécanique des fluides. Ils avaient certainement tâtonné pendant des siècles. L'empirisme de leurs recherches avait néanmoins abouti à une solution élégante. Ils la testèrent durant quelques générations. Une fois le savoir-faire établi, ils concoctèrent un dicton facile à retenir : « Moins large que profonde ». L'effet cliquet continuait à faire avancer la bioclimatique. Dans la plaine près d'Orange, le vent souffle particulièrement fort. Devant un chais, là où on manœuvrait les barriques de vin, nos anciens avaient construit un mur percé sur près de quatre mètres de haut.

Les ouvertures en sont un peu plus larges que profondes. Elles laissent donc passer le vent malgré les turbulences. Mais plus les rafales sont violentes, plus le filet d'air qui traverse chaque trou devient fin, pour que la flamme d'un briquet vacille à peine.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Les Provençaux de la campagne vivaient surtout à l'extérieur. Lorsqu'ils travaillaient dans des cours, ils aimaient que celles-ci soient protégées du mistral. Ils ont développé différentes solutions en ce sens. Le plus souvent, il s'agissait d'arbres au feuillage persistant sous lesquels ils faisaient pousser des buissons drus. Ce qui supposait que ces arbres n'empêchaient pas la pousse de plantes sous leurs frondaisons (les chênes verts et les pins ont ce défaut, mais pas les cyprès).

Les villages et le mistral

Les villages eux-mêmes protégeaient leurs habitants du vent. Pour ce faire, les rues étaient tortueuses et ne s'alignaient jamais selon l'axe nord-sud. Le mistral ne pouvait y accélérer. Sur le plan d'Avignon ci-contre, on remarque immédiatement le tracé des premiers remparts : les seules rues qui soient dans un axe propice au mistral (nord-sud). De nombreux détails constructifs montrent cette attention particulière que les anciens attachaient à éviter les désagréments causés par l'éternel fléau de la Provence : le mistral.

Le vélum que formait l'ensemble des toits d'un village est toujours arrondi et de faible pente. Seuls les puissants clochers des églises en dépassent.

L'arrondi sous cette marche n'a pas été taillé par hasard : lorsqu'un souffle d'air déplace la poussière au ras de la terre, cette forme plaque la poussière au sol. Elle ne pénétrera donc pas dans la maison.

Plan d'Avignon XV^e siècle : seules les rues qui couvrent le tracé des anciens remparts sont dans l'axe du mistral (N-S). Les rues des villages provençaux ne se trouvent jamais dans cet axe, ou alors elles sont tortueuses pour éviter que le mistral ne s'y engouffre.

À noter

La force du vent est proportionnelle à la densité de l'air (jusqu'à + 25 % s'il fait froid et humide) et surtout : proportionnelle au carré de sa vitesse. La puissance du vent est proportionnelle au cube de sa vitesse.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Copyright © 2016 Eyrolles.

PARTIE 3

MISE EN ŒUVRE DES PROCÉDÉS BIOCLIMATIQUES AUJOURD'HUI

Nous souhaitons des intérieurs lumineux, sains et thermiquement confortables. Nous inspirer des solutions bioclimatiques mises au point par nos anciens peut nous y conduire, d'autant mieux si nous utilisons les caractéristiques physiques des matériaux actuels.

Une construction bioclimatique optimisée peut constituer un bâtiment passif, structurellement, sans dépendre de machines compliquées qui, par essence, ne sont pas éternelles. Ce qui suppose que les parois en aient été soigneusement conçues et précisément adaptées aux conditions climatiques locales.

Dans nos régions où la moyenne annuelle des températures diurnes est clémente, ceux qui ont acquis un bâtiment ancien seront vigilants à ne pas en casser l'équilibre des mécanismes thermiques : ils utiliseront la masse du bâti pour adapter l'isolation nécessaire à leurs besoins. Ceux qui souhaitent construire leur maison passeront par la longue étape de la conception bioclimatique.

Copyright © 2016 Eyrolles.

12| Rénovation

Comment était la maison originellement ? Le cadastre napoléonien a couvert tout le Midi de la France. Il fut élaboré entre 1807 et 1850. Vous pouvez y apprendre le nom du premier propriétaire de votre maison. Si une source proche a été relevée, elle y est indiquée. Vous y trouverez surtout le rendu précis des surfaces qui étaient construites au XIXe siècle. En d'autres termes, grâce au cadastre napoléonien, vous identifierez tous les bâtiments qui ont été construits depuis 1850 et accolés au bâtiment originel. C'est-à-dire tous les volumes construits depuis que le chauffage permet de se passer de la seule logique bioclimatique. Le plan d'occupation du sol de la structure originale vous permettra d'identifier assez rapidement les pièces d'habitation et les pièces de travail (les pièces principales et pièces tampons).

1. Quel type d'isolation choisir ?

Depuis qu'un jour un mestre a conçu le fonctionnement thermique de la maison que vous regardez, depuis qu'il a présidé à sa construction, l'usage des pièces de la maison a changé et celle-ci a certainement connu des modifications depuis son premier occupant.

Jusqu'en 1800, les divers propriétaires avaient respecté les pièces principales. Il y avait bien eu un paysan enrichi par ses cocons de soie qui avait construit un escalier de pierre à l'extérieur de la pièce principale. Il avait donc percé une porte à l'avant du mur est, qui donnait sur une entrée et sur la montée aux chambres. La cage d'escalier et ladite entrée constituaient une pièce tampon qui protégeait encore un peu plus du froid humide qui descendait des Alpes l'hiver.

Comme le verre laminé avait été inventé et que son prix avait considérablement diminué, le paysan en avait profité pour transformer l'ouverture de la porte d'entrée initiale en une grande fenêtre avec volets. Selon les époques, selon leur métier, les propriétaires suivants avaient ajouté ou enlevé un mur extérieur autour de la cour, un clapier, un appentis ou un auvent, mais la pièce principale du rez-de-chaussée et les chambres de l'étage n'avaient jamais été affectées. Puis il y eut la folie des grandes fenêtres vitrées. Ensuite vint la mode des volets parfaitement jointés.

Quand l'invention des machines à vapeur allégea le travail des ouvriers des usines d'ocre, voilà que les gens riches décidèrent unanimement d'enduire

Copyright © 2016 Eyrolles.

les façades de leurs maisons. Cela protégeait la paroi et ça améliorait un peu l'équilibre bioclimatique des pièces à vivre : puisque les artisans du moment leur avaient conseillé des teintes tirant vers le rouge, les murs captaient encore plus la chaleur des ultraviolets d'hiver. Ces enduits étant à base de chaux aérienne, les flux hydriques à travers les parois avaient été maintenus.

La Première Guerre mondiale avait dépeuplé les campagnes. Les artisans travaillaient moins bien mais avec de meilleurs produits. Il avait appris de nouveaux mots : « moteur » et « garage ».

Histoire type d'une maison ancienne de Provence

La Seconde Guerre mondiale avait détruit beaucoup de maisons, mais pas celle dont nous parlons. Les pièces principales avaient été épargnées par les bombardements, mais pas par les habitants. Il y avait une telle pénurie de logements que la grange était maintenant habitée : on y avait placé deux pièces superposées. Le sol de terre battue y avait été creusé puis couvert de graviers, puis étanchéifié, et on y avait collé des carreaux de terre cuite. Les habitants y avaient trop chaud en été et trop froid en hiver. Alors ils avaient construit en ciment un prolongement du cellier dans lequel ils avaient mis un chauffage. Puis ils avaient fait percer tous les murs de la maison pour y passer des tuyaux métalliques qui conduisaient à des radiateurs en fonte. Ces tuyaux s'ajoutaient à ceux qui amenaient l'eau courante à la cuisine. Comme il faisait plus chaud dans le cellier, on y avait installé quelque chose d'incroyable : une salle de bains. Les habitants remplissaient un grand récipient en céramique avec de l'eau chaude et se baignaient dedans. Les murs de la maison étaient devenus humides à chaque bain d'hiver : l'eau se condensait sur les murs et les ponts thermiques s'étaient multipliés au niveau des tuyaux, lesquels ne chauffaient plus une pièce tampon mais l'air environnant. Trois nouveaux mots furent employés pour sa rénovation : « ciment », « plastique » et « chauffe-eau ». À l'extérieur, les habitants avaient fait appliquer par un maçon un enduit projeté dont la couleur correspondait aux règles d'urbanisme locales.

Rigole le long d'une rue, typique des vallées du Rhône et de la Durance, zones d'orages violents. À gauche, sur la chaussée en bitume, un produit moderne résultant du raffinage du pétrole, l'eau des pluies s'écoule librement et accélère dans la pente. À droite, on a créé une rigole à l'aide de galets plantés selon deux axes perpendiculaires dans du sable, des produits disponibles à proximité. Si la pluie est fine, l'eau s'infiltre dans le sable, entre les galets. Lorsque la pluie est peu abondante, l'eau s'écoule dans le creux de la rigole, l'axe des galets de fond favorisant son écoulement. Quand un orage s'abat, l'eau qui s'écoule couvre surtout les galets perpendiculaires à l'axe de la pente, qui la freinent et évitent les ravinements.

Les habitants trouvaient aussi que leur habitation n'était pas très confortable. Ils commençaient à apprécier la chaleur du chauffage et ne voulaient plus passer l'hiver à endurer la fraîcheur. Ils ne toléraient plus 14 °C, mais disaient se sentir bien

Copyright © 2016 Eyrolles.

à 20 °C. En 1977, une crise politique commença en Libye, qui aboutit à une augmentation brutale du coût du pétrole et donc du chauffage. Alors, les habitants de « la grange » décidèrent d'isoler leur logement : ils firent apposer des plaques de dix centimètres de laine de verre à l'intérieur des murs, tenues par des armatures en aluminium, et recouvrirent le tout de fines plaques de plâtre. Ils passèrent en bas deux couches croisées de peinture glycéro mate et, à l'étage, ils tapissèrent les murs des chambres de papier peint vinylique. Chaque hiver, l'humidité se condensait quelque part entre les murs de pierre, terre et chaux, et les plaques de plâtre. Elle mouillait la laine de verre et la terre entre les pierres. Cette eau n'étant ni évacuée ni absorbée, elle stagnait là et abîmait constamment la paroi. Partout où un tuyau d'eau chaude traversait l'isolant et une paroi, il se créait des colonies de bactéries à l'interface.

Les habitants trouvaient que l'intérieur de leur logement était bien chauffé, et l'intérieur des parois restait sec au toucher. Ils n'avaient aucune idée de ce qui se tramait entre l'isolant et la paroi de leur habitation, chaque fois que le point de rosée était atteint, puisque des parois ils ne voyaient que la peinture d'un côté et l'enduit de l'autre. Entre ces deux couches, les murs de leur maison se détérioraient lentement. On avait choisi des pierres tendres parce qu'elles étaient solides et qu'elles régulaient bien l'humidité dans l'habitation : petit à petit, la surface de ces pierres se transformait en une poudre impalpable et la structure de la maison se fragilisait inexorablement.

Maison ancienne

Vous venez d'acquérir une maison ancienne. Elle a été construite avant 1850 ou bien, isolée dans les champs, avant la Première Guerre mondiale. À cette époque, on n'utilisait encore ni le charbon ni les dérivés du pétrole pour chauffer les bâtiments. C'est la structure d'une maison qui assurait l'essentiel du confort thermique de ses pièces centrales, pas un réseau de radiateurs.

Quelle que soit la bâtisse, le cahier des charges qui avait présidé à sa construction correspondait aux nécessités d'une époque bien révolue. Les habitants y enduraient l'hiver, pelotonnés près d'une cheminée, travaillant à leur artisanat en attendant que les beaux jours reviennent. Ils se couchaient les uns contre les autres, se réchauffant de leur chaleur corporelle, seules leurs têtes dépassaient des couvertures et elles étaient coiffées d'un bonnet de nuit. Ces modes de vie nous prouvent que, si en Provence la structure des maisons assurait un confort thermique que nous jugeons très satisfaisant en été, nous le considérons comme très insuffisant en hiver.

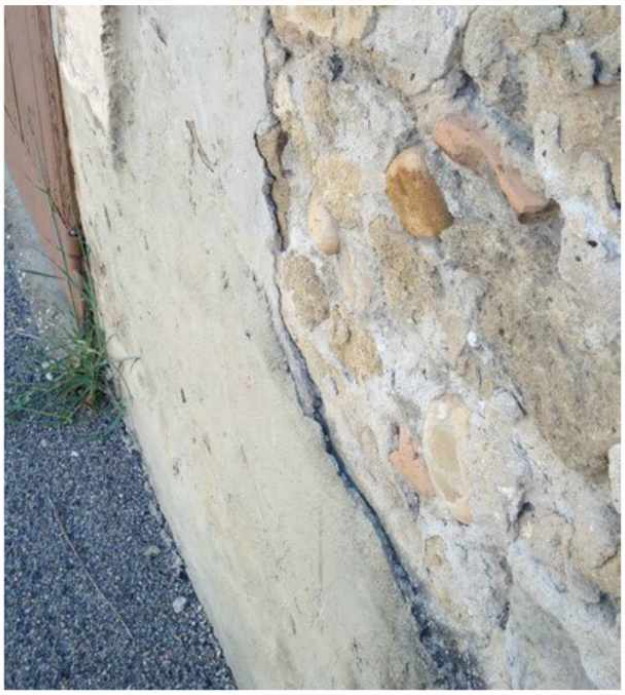
Si la maison que vous venez d'acquérir est restée intégralement « dans son jus », si aucune modification n'y a été apportée depuis le XIX^{e} siècle, vous allez rencontrer un problème de froid chaque hiver.

Depuis 1850, cette maison a vraisemblablement été habitée. Les propriétaires successifs y ont apporté les modifications qu'ils ont estimées nécessaires. Au fur et à mesure du temps (et de leurs moyens), on peut imaginer que le petit bijou bioclimatique qui avait été édifié à l'origine a vu ses particularités thermiques modifiées au cours de son existence. Vous venez d'acquérir ce bâtiment, vous souhaitez y vivre confortablement et vous êtes disposé à entreprendre quelques travaux de rénovation… Que devez-vous faire et que devez-vous éviter d'y faire ? Commencez par établir une représentation simple des influences climatiques subies par le bâtiment.

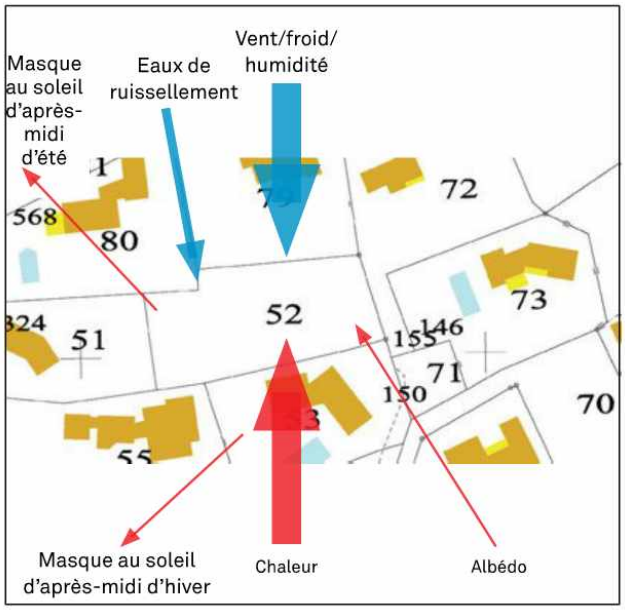
À noter

Les végétaux qui poussent à proximité d'un bâtiment fournissent une bonne indication de l'humidité des sols (roseaux, mousses, iris, saule pleureur, etc., ou bien cistes, cactées, romarin, etc.).

Copyright © 2016 Eyrolles.



Un propriétaire antérieur avait trouvé ce mur trop humide et l'avait « protégé » d'un enduit à base de ciment. Dessous, du salpêtre s'est formé ainsi que de grandes colonies bactériennes (en noir) qui attaquent la pierre tendre : une poudre de pierre inconsistante s'est formée entre la paroi et l'enduit ciment. Il n'y a qu'une seule solution : décroûter tout l'enduit au ciment et appliquer une finition à base de chaux.



Contraintes climatiques. Extrait du cadastre de Rochefort-du-Gard. Source : Direction générale des finances publiques – Cadastre. Mise à jour 2015.

Votre cahier des charges dépendra de la maison dont vous êtes devenu le propriétaire et des moyens que vous êtes disposé à investir. Supposons trois cas tout à fait distincts :

- une maison de campagne (mas, bastide...), plus ou moins grande ;
- un cabanon des champs ;
- une maison de ville ou de village.

2. Une maison de campagne

Vous souhaitez vous servir de cette maison comme lieu de vacances, voire de week-end, ou bien vous souhaitez y vivre à demeure, toute l'année.

Si vous souhaitez l'occuper de manière intermittente, la première question que vous posera un bioclimaticien sera : « Et viendrez-vous l'habiter en hiver ? ». La réponse est d'une importance considérable.

- Si votre famille occupe cette maison durant les deux mois d'été et quelques périodes à l'automne et au printemps, vous n'aurez à vous préoccuper que de maintenir la maison hors gel pendant les quelques semaines de pic des hivers provençaux (cas 1).
- Si vous décidez qu'elle représentera votre maison de famille et que vous y réunirez vos petits-enfants à chaque fête de Noël, alors il faudra que la maison puisse être chauffée relativement rapidement. À moins que vous ne soyez disposé à allumer le chauffage pendant tout le mois de décembre afin de permettre la montée en température de la masse thermique d'une maison vide... il vous faudra l'isoler par l'intérieur. Il faudra aussi trouver des solutions bioclimatiques qui permettent de rafraîchir une telle maison en été alors que l'essentiel de sa masse thermique se trouve à l'extérieur de l'isolant (cas 2).

Si vous souhaitez occuper votre maison de façon permanente, le besoin d'isolation différera selon le climat local.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Déjeuner à l'extérieur

Devant la cuisine et/ou le salon, on prévoira soit un auvent soit une pergola végétalisée. La vigne vierge est la plus efficace, mais elle demande un minimum d'entretien. La solution idéale, à long terme, consiste à planter un platane au sud de la maison.

- Si vous vivez en bord de mer, vous aurez plus besoin de masse thermique que d'isolant (cas 3).
- Si la maison se trouve à l'intérieur des terres, on favorisera un déphasage saisonnier en stockant la chaleur de l'été pour l'utiliser en hiver, et inversement : la fraîcheur de l'hiver pour l'été (cas 4).

En moyenne nationale, chaque bien immobilier change de propriétaire tous les huit ans, en France. Pour les bâtiments anciens du sud de la France qui sont occupés de manière permanente, cette moyenne dépasse à peine les dix ans.

3. Habitat intermittent non utilisé en hiver (cas 1)

La demande principale consiste généralement à prévoir de déjeuner dehors, à l'ombre, non loin de la cuisine. Ce cahier des charges exige souvent un congélateur.

Isolant

Il s'agit du seul cas où l'isolation des parois n'est, en règle générale, pas nécessaire en Provence. Ce qui laissera toute latitude à la personne à laquelle vous revendrez d'isoler ou non ce bâtiment. Il s'agit fréquemment de maisons situées relativement loin des villes ou des transports en commun.

Isolation des combles

En été, l'air piégé sous les tuiles atteint fréquemment des températures de 80 °C. Les chambres se situant couramment à l'étage, il y a lieu d'isoler les combles. Un déphasage de douze heures correspond à 28 cm de ouate de cellulose soufflée, avec une densité de 40 kg/m^3.

Tous les isolants à base de bois peuvent convenir, mais la ouate de cellulose soufflée a l'avantage de présenter l'un des meilleurs rapports efficacité/coût pour l'isolation des combles en Provence. Elle a l'inconvénient de se tasser un peu, avec le temps.

Si vous envisagez d'utiliser les combles pour en faire des chambres, alors il faudra isoler les rampants. C'est beaucoup plus onéreux. Le plus efficace consiste à enlever les tuiles, à placer deux couches en quinconce d'un isolant à base de bois qui soit recouvert d'un panneau pare-pluie (qui servira aussi de pare-vent). Plusieurs marques en produisent, s'il faut en citer une : Pavatex.

Isoler sous le toit sans déplacer les chevrons impliquerait un travail très soigneux (lent donc onéreux) qui consisterait à découper puis à placer des panneaux d'isolant entre les pannes et les poutres, puis par-dessous les pannes. Il suffirait ensuite de fixer soigneusement des panneaux de bois perspirants avec des tire-fonds ou des vis longues (pour ne pas écraser l'isolant).

Quel que soit le cas de figure, un isolant qui ne serait pas perméable à la vapeur d'eau est à proscrire dans des combles, à moins d'y avoir envisagé une ventilation naturelle conséquente.Dans le « cas 1 », on n'envisage aucun autre isolant.

Pièces tampons

La façade qui reçoit le vent devrait être isolée par une simple pièce tampon :

• soit par l'intérieur : on couvrira cette façade de placards et rangements (fermés) multiples. On dit d'ailleurs que les maisons de vacances manquent toujours de rangement ;

Copyright © 2016 Eyrolles.

Pièce tampon au nord, dans l'ancien cellier à vin : la pièce la plus fraîche a été transformée en hall d'entrée, un lieu où notre corps accepte des températures plus basses puisqu'il émet une énergie musculaire.

La façade ouest de cette ferme arlésienne (peinte par Van Gogh) avait été protégée du soleil des après-midi d'été (et du vent) par une grange : un prolongement du toit et deux parois légères. Notez que les ouvrants de la façade ouest donnent sur l'intérieur de la grange. Les deux rangées de platane qui bordent la voie ajoutent une protection complémentaire.

• soit par l'extérieur (ce qui sera le plus efficace) : en y édifiant des locaux non chauffés (garage, buanderie, serre bois, etc.) ; ou un patio dont le mur protégerait du vent une fenêtre de salle de bains (et préserverait l'intimité), mais à condition de prévoir l'évacuation de l'air frais qui pourrait y stagner en hiver (un soupirail vers une pente, par exemple) ; ou une simple lame d'air (voir chapitre « Autoconstructeurs »).

À défaut, si vraiment aucune solution extérieure n'est possible : prévoir une haie végétale haute (cyprès) qui pourrait protéger la façade exposée au vent dominant.

À noter

L'essence de vigne vierge choisie pour couvrir les parois sud et ouest est un porte-greffe stérile très vigoureux. Elle a l'avantage de ne pas produire de fruits. Elle n'attire donc pas les insectes. Son effet rafraîchissant sur les murs peut être considérable. Son feuillage d'été et sa perspiration cumulent leurs effets. On comprend que les anciens Provençaux l'aient autant utilisée. Accessoirement, elle filtre les poussières, absorbe du gaz carbonique, oxygène l'air et protège la façade des vents.

La façade ouest reçoit le soleil de l'après-midi

Tous les rayons de soleil qui arriveront sur la façade ouest avec un angle supérieur à 45° à l'ouest du sud devront être masqués. Le plus simple et le plus rapide consiste à planter une vigne vierge. Un bouquet d'arbres taillés pour masquer toute cette façade serait encore mieux s'il était persistant (cyprès, lauriers, magnolias, tilleuls...). Si la configuration des lieux interdit une solution végétalisée, alors on peut couvrir la façade ouest d'une lame d'air ventilée en construisant une double peau ou une grange ouverte on évitera toute surface réfléchissante au sol du côté ouest de la maison.

La décoration intérieure utilisera le plus de matériaux minéraux poreux possible. Les plafonds provençaux, très esthétiques et si typiques, alternent le plâtre et le bois. Ils peuvent capter une grande quantité de vapeur d'eau.

Notez que le matériau constructif qui peut absorber le plus d'humidité est la terre crue légèrement

Copyright © 2016 Eyrolles.

argileuse. Elle relâchera cette vapeur d'eau plus lentement que le plâtre.

3. Habitat intermittent occupé en hiver (cas 2) : isolation par l'intérieur

Où placer l'isolant ?

Si l'isolant se trouve du côté extérieur des parois, la masse thermique se trouvera à l'intérieur. La maison sera confortable, mais une maison froide sera alors longue à chauffer. Plus la bâtisse sera lourde, plus ses murs seront épais et plus il faudra de temps et de chauffage pour les faire monter en température.

À l'inverse, si l'isolant se trouve à l'intérieur du bâtiment, la masse des murs extérieurs ne participera pas à la masse thermique du bâtiment. On chauffera donc plus vite son logis. Le gaspillage de chauffage sera moindre pour que la température de l'air devienne agréable. Mais les murs de refend, lourds et épais dans ces maisons, font des ponts thermiques formidables. En d'autres termes : on chauffera plus vite, mais l'isolation aura une faible efficacité, sauf à isoler aussi toutes les dalles et murs de refend sur toutes leurs faces (à l'intérieur du bâtiment).

Dans le cas d'un habitat intermittent servant en hiver, il faudra donc bien évaluer combien de jours d'hiver on occupera sa maison de vacances. Il faudra aussi prendre en compte les particularités du climat local.

- En altitude, au pied d'un massif montagneux ou le long des rives de la Durance, le froid hivernal est particulièrement vif. Une utilisation de la maison pour les vacances scolaires de Noël et de février, plus quelques week-ends, amènerait à consommer moins de chauffage si la bâtisse était isolée par l'extérieur.

La maison principale (85 m²) se compose d'une pièce à vivre au rez-de-chaussée et d'une chambre avec salle de bain à l'étage. Elle est isolée par l'intérieur. Le bâtiment annexe ne sert qu'en été (chambre d'amis avec salle d'eau-buanderie) : il n'est isolé qu'en plafond. © Shutterstock/Jakez.

- À Saint-Rémy, une grande maison qui, l'hiver, n'est utilisée que pendant les vacances scolaires de Noël consommera moins de chauffage si elle est isolée par l'intérieur.

On y chauffe surtout l'air, et les murs de refend ont à peine le temps de s'échauffer à cœur : le pont thermique qu'ils représentent n'a pas le temps de fonctionner à pleine puissance. Si, durant ces quinze jours de vacances, le point de rosée est atteint dans les murs, il l'est durant relativement peu de temps sur l'année, ce qui n'est pas trop grave si on a employé un isolant hygrophile (laine ou fibre de bois).

L'isolation par l'intérieur a le défaut d'apporter une atmosphère nettement moins confortable que l'isolation par l'extérieur. Les grands murs de refend communiquent par leur tranche avec l'extérieur. Ils ont donc tendance à diffuser beaucoup de froid à l'intérieur de la maison en hiver (sauf ceux dont la tranche donne au sud). Il faut donc, pour éviter l'effet de « paroi froide », les couvrir d'au moins une fine couche d'air : tapisseries, tableaux, meubles, placards. Les deux murs de refend de la maison de Saint-Rémy citée plus haut ont été couverts de tissu tendu sur molleton au rez-de-chaussée et de lambris à l'étage.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Humidité dans une paroi

Dans le cas de murs en pierres de taille, les mestres utilisaient des pierres tendres relativement poreuses (densité comprise entre 1 300 et 1 800 kg/m³), dont le coefficient de résistance à la vapeur d'eau varie entre 10 et 30 selon leur degré d'humidité. Aussi un frein-vapeur placé du côté intérieur de l'isolant suffit-il généralement à éviter des condensations dramatiques, même dans une salle de bains (Sd du frein-vapeur = 1 à 5 m).

Dans le cas d'un mur édifié en pierres/terre/pierres, les pierres qui constituent la face interne du mur sont des pierres fermes (densité comprise entre 2 000 et 2 350 kg/m³). La condensation est plus importante. Un isolant hydrophile (à base de bois) devient indispensable. On recommandera un frein-vapeur dans les salles humides (cuisine, salle d'eau) pour des climats pas trop violents. Dans les zones à hivers très rigoureux (Cévennes, pied des Alpes, est du Ventoux, vallée de la Durance, etc.), on utilisera partout des freins-vapeur hygrovariables (dont les pores s'ouvrent ou se ferment en fonction de l'humidité de l'air). Les parois en terre tassée (pisé, tapi, etc.) ont une densité comprise entre 2 000 et 2 200 kg/m³). Elles craignent l'eau. Elles sont, par ailleurs, particulièrement sensibles à la condensation de l'humidité, surtout si elle est prolongée. Un isolant très hydrophile est indispensable (fibre de bois ou laine de bois), précédé d'un Fermacell ou de briques plâtrières (surtout pas de plaques de plâtre). Notez qu'un papier peint vinylique ou un mur de carreaux céramique (monté à la colle) font d'excellents pare-vapeur, alors que des lambris en bois ou des carreaux de céramique montés à la chaux constituent des freins-vapeur.

En cas d'isolation par l'intérieur, il y a moins de risque de condensation interne lorsque, de l'intérieur vers l'extérieur, les matériaux sont de plus en plus perméables à la vapeur d'eau (d'où l'usage indispensable d'un frein-vapeur).

Si un isolant est très perméable à la vapeur d'eau (cas des laines minérales), la pression de vapeur sera à peu près constante dans toute l'épaisseur de l'isolant. Mais, puisqu'il s'agit d'un isolant, la chute de température sera importante entre sa face interne et sa face externe. Donc, dans l'isolant, il y a un endroit où la pression de vapeur d'eau va dépasser la pression de saturation : il y aura condensation. Or, si une laine minérale s'humidifie, elle perd définitivement une grande partie de son pouvoir isolant.

Le véritable problème rencontré par la structure des maisons anciennes isolées par l'intérieur est la position du point de rosée au sein de la paroi. Deux mois par an, en Provence, une paroi lourde, froide, est séparée d'un logis chauffé et riche en humidité : la vapeur d'eau qui a traversé l'isolant se condense en eau à l'interface avec la paroi de pierres.

Si la maison n'est occupée qu'une ou deux semaines au cours de l'hiver, le reste du temps elle sera simplement gardée hors gel. Il n'y aura pratiquement pas de condensation dans le mur.

Astuce architecturale : percer une porte dans un mur de refend au plus près de la paroi diminue considérablement le pont thermique.

4. Habitat permanent en bord de mer (cas 3) : isolation du sous-sol

La forte masse thermique de « la belle bleue » tempère le climat des zones limitrophes du bord de mer. Le climat n'est pourtant pas si modéré qu'un « estranger » pourrait le croire : les vents côtiers et les remontées maritimes de fin de journée induisent des particularités architecturales spécifiques. On ne craint pas les hivers rigoureux, mais parfois, une chute de neige surprend les habitants de la Côte d'Azur. Faut-il pour autant isoler les maisons en appliquant le même « principe

Question

Soit une maison de 10 × 10 m entre les murs. Si on l'isole par l'intérieur de 20 cm d'isolant + parement de 3 cm, alors la surface au sol passe de 100 m² à 95 m². Est-ce que le surcoût d'une isolation par l'extérieur dépasse la valeur de 5 m² de cette maison ?

Copyright © 2016 Eyrolles.

de précaution » qui voudrait que chaque municipalité de bord de mer dispose d'un chasse-neige ?

Une maison ancienne, située sur la frange côtière, reste fraîche en été. Sa masse thermique lui permet d'assurer une ambiance confortable lors d'une chute brusque (mais brève) des températures. Elle a été conçue à une époque où le climat affichait des températures légèrement plus basses qu'aujourd'hui, mais les habitants toléraient aussi des excès que nous n'accepterions plus. Or il est tout à fait possible que le changement climatique en cours induise des hivers un peu plus longs, voire des épisodes de froidure violents.

La mode des climatisations réversibles (détente directe sur air) et des pompes à chaleur réversibles (sur circuit d'eau) a largement touché l'extrême Sud de la France. Ces appareils fonctionnent très mal lorsque le climat est froid (ils consomment plus d'énergie qu'ils n'en restituent lorsque l'air a atteint des températures négatives). Une climatisation réversible étant alors encore moins efficace qu'une pompe à chaleur réversible, il y a donc lieu de tenter de placer ces appareils dans des zones à l'atmosphère tiédie (des espaces tampons : patio, garage, remise attenante à la maison...).

Les formes arrondies de cette maison ancienne sont adaptées aux vents d'ouest locaux, mais elles rendent l'isolation des parois très difficile ou très onéreuse. L'augmentation de sa masse thermique par l'isolation de son sous-sol est une solution particulièrement adaptée.

La solution bioclimatique contre ces pics de températures extrêmes consiste à augmenter l'inertie du bâtiment. Évidemment, on isolera les combles, puisque cette isolation protégera des excès de chaleur d'été et empêchera l'air chaud de s'échapper par le haut en hiver. On peut aussi augmenter l'inertie de la maison en utilisant la masse thermique qui se trouve sous le bâtiment. Celui-ci est construit sur des fondations très peu profondes (sauf en zones humides).

Si on dispose une membrane étanche tout autour de la maison qui descend sous le niveau des fondations, les nappes d'humidité interstitielles qui passent sous le bâtiment circuleront un peu plus bas, ou bien elles seront déviées latéralement. Les fondations « pomperont » donc beaucoup moins d'humidité du sol.

Accessoirement, s'il y a des phénomènes de gonflement/dégonflement d'argile sous la maison, ils seront considérablement atténués (et se produiront de manière plus lente et progressive). On peut imaginer une membrane qui s'enfoncerait d'un mètre dans le sol.

Si, au lieu d'une membrane étanche, on enterre un isolant continu autour de la maison, on isolera latéralement une tranche de terre (de la hauteur de l'isolant). Cette tranche de terre communique par sa surface basse avec la terre (plus profonde d'un mètre) et par sa surface haute avec la dalle de plancher. Or le plancher affiche toujours une température supérieure à la terre qui se trouve un mètre en dessous. L'essentiel de l'échange thermique de la tranche de terre va donc se faire vers sa partie supérieure : à l'interface avec le plancher de la maison.

En plaçant un isolant tout autour de la maison, on profite de l'essentiel de la masse thermique de la tranche de terre que l'on vient d'isoler.

Quel isolant choisir ? On souhaite faire barrage à l'humidité, il faut donc choisir un isolant

Copyright © 2016 Eyrolles.

pratiquement étanche. Il va subir des pressions sur son épaisseur (gonflement/dégonflement des terres du jardin, par exemple), il faut donc choisir un isolant qui contienne des bulles d'air (elles pourront se déformer légèrement sous la pression). L'isolant va connaître des variations d'humidité, il doit donc être imputrescible. Comme il se trouvera sous terre et qu'on ne pourra contrôler aisément son état, il vaudrait mieux qu'il soit pérenne. Accessoirement, un isolant enterré est peu susceptible de brûler. Il y a plusieurs solutions sur le marché qui correspondent à ce cahier des charges, la moins onéreuse semble être le polystyrène expansé (4 €/m^2 environ). En zone sismique avérée, le polystyrène extrudé (nettement plus onéreux) offre l'avantage de diviser par deux (environ) l'effet de cisaillement des ondes sismiques. D'autres isolants, tout aussi honnis par les écologistes parce qu'indestructibles, peuvent être utilisés (polyuréthane, isocyanurates, etc.).

Comment le placer, et à quelle hauteur ? Il vaudrait mieux que l'isolant dépasse d'au moins 10 cm (voire 20) du niveau du sol, parce qu'il constituerait alors une barrière efficace contre les termites. Il permettrait aussi d'isoler la terre des plates-bandes (qui est arrosée régulièrement) du mur de la maison. Les panneaux de polystyrène expansé se vendent en général en 1,20 m de large : s'il dépasse de 20 cm, le panneau sera enterré d'un mètre. Pour placer l'isolant, il suffit de creuser une tranchée étroite (avec une machine appelée « trancheuse ») tout autour de la maison. On y glisse deux rangées de panneaux d'isolant (d'au moins 6 cm d'épaisseur chacune), de façon à ce que les panneaux de la seconde rangée couvrent les jonctions de ceux de la première rangée. On comble le trou de terre bien tassée... et cette maison a gagné en masse thermique à peu près l'équivalent de sa surface fois un mètre de hauteur de terre !

Maisons de village traditionnelles de la côte d'Azur, à Villefranche-sur-Mer. Ces petits immeubles se chauffent au soleil d'hiver grâce à leurs teintes (jaunes ou rouges) qui absorbent les ultraviolets. Impossible de les isoler par l'extérieur étant donné leur alignement parfait et leurs petits balcons (qui procurent de l'ombre) ; ils ne sont tempérés que par la masse thermique de leurs fondations. © Fotolia/Patrycja Caban.

Quel intérêt ? Cette masse thermique a été réchauffée tout l'été et à mi-saison par la maison. Sa température s'est donc stabilisée à peu près à 23 °C. En cas d'épisode hivernal brutal, elle va réchauffer le sol de la maison à 23 °C et, à force d'équilibrer les températures entre sa masse thermique et le logis, descendre lentement en température. Les habitants auront un très faible besoin de chauffage si l'hiver est court. Pour faire simple : en creusant cette tranchée et en y plaçant un isolant continu, vous avez stocké des calories pour l'hiver... et il en sera ainsi pendant des dizaines et des dizaines d'années (on prédit une durée de vie de 500 ans au polystyrène enfoui). Notez que, après broyage, le polystyrène est recyclable à 100 %.

En été, cette masse thermique, stabilisée autour de 23 °C, atténuera de manière tout aussi efficace les pics de chaleur. Un épisode caniculaire de deux semaines est considéré comme long, il sera à peine perceptible dans la maison.

Cette solution s'applique aux maisons anciennes. Elle peut aussi s'appliquer aux maisons en bois modernes ; bien isolées, si elles finissent par

Copyright © 2016 Eyrolles.

À noter

Une paroi enterrée en polystyrène extrudé est suffisamment forte pour supporter l'appui partiel d'un complexe isolant autoporteur de 8 mètres de haut. Ce n'est pas le cas d'un polystyrène expansé. Dans ce dernier cas, le polystyrène expansé devra nécessairement être couvert d'une poutre ou d'un madrier (« la poutre sablière basse ») sur laquelle viendront se fixer les pieds des madriers qui supportent l'isolant.

surchauffer dans le Midi, c'est essentiellement par manque d'inertie thermique à l'intérieur du volume isolé.

5. Habitat permanent à l'intérieur des terres (cas 4) : isolation par l'extérieur

Vous avez trouvé la maison de vos rêves, elle a vue sur les oliviers et les montagnettes, les cigales y chantent chaque été, la campagne est belle. Vous voudriez vous y retirer, mais la maison est ancienne et n'est pas isolée. Un propriétaire antérieur y a ajouté une grande pièce (une annexe) construite en parpaings et coiffée de fermettes.

Vous avez compris que les pièces de la maison originelle sont très agréablement fraîches en été et que « l'annexe », orientée à l'ouest, n'est confortable que si toutes les fenêtres restent ouvertes. Vous voudriez une chambre de plus pour accueillir vos invités. Le vendeur n'arrive pas à trouver ou ne veut pas trouver ses factures de chauffage, ce qui vous inquiète. Vous avez alors demandé un devis à un chauffagiste et il vous a recommandé une puissance de 20 000 watts : vous avez donc pensé à isoler.

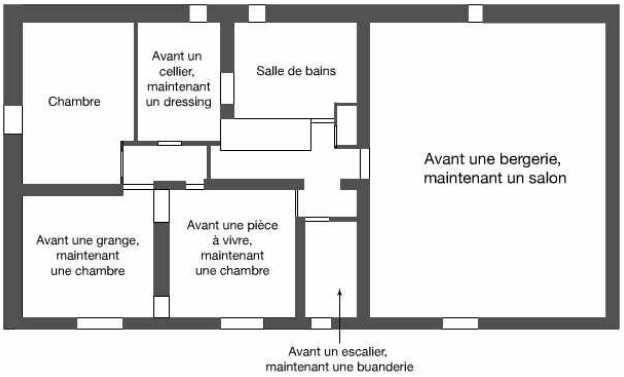
Votre premier réflexe a été d'interroger des professionnels, d'abord un architecte rencontré, ensuite deux marchands de matériaux, et vous avez consulté trois sites Internet spécialisés. L'architecte vous a conseillé de conserver les façades extérieures et d'isoler par l'intérieur. Les marchands d'isolants vous ont dit qu'ici le procédé traditionnel consistait à monter, à l'intérieur, de la laine de verre sur des rails en aluminium et à couvrir le tout de plaques de plâtre fines. Deux des trois sites Internet que vous avez consultés vous ont confirmé les dires des vendeurs de matériaux, mais le troisième site affichait une opinion différente : il disait que les murs de refend engendraient des ponts thermiques et qu'il fallait soit installer des rupteurs soit isoler par l'extérieur.

Cinq avis contre un : normalement, votre opinion aurait dû être faite, mais étant donné les sommes en jeu, vous avez préféré fouiller un peu la question. Le hasard est intervenu, vous avez rencontré un menuisier amoureux des vieilles pierres qui, de son accent chantant (et souriant), vous a asséné un « Oh, pauvre ! Plâtre et laine minérale ? D'abord vous allez tuer l'isolant et après ce sera la maison ! », suivi d'une litanie de souvenirs et d'anecdotes sans doute exagérés.

L'architecte avait raison : la façade est superbe, il faut conserver son esthétique provençale. À l'ouest, il y a l'annexe, sans intérêt architectural majeur : un cube avec un toit en tuiles surplombé par une paroi aveugle. Au nord, un long mur haut percé d'une fenêtre minuscule. À l'est, un garage est construit à trois mètres de la maison, devant un pan de mur et ses quatre fenêtres. Finalement, ce que vous préférez, c'est la façade sud, plein sud, et sa grande tonnelle de vigne. Vous aimez bien aussi le puits dans sa vieille tourelle bâtie, juste au nord de la maison, avec son eau claire et froide.

Il y a trois petites fenêtres au nord : l'une sur le cellier, l'autre sur une salle d'eau et la troisième à l'étage, en haut de l'escalier, qui permet un courant d'air traversant. Toutes sont précédées d'un volet léger en moustiquaire, puis d'un volet en bois rouge qui ferme sur des joints en caoutchouc recouverts d'une fine bande aluminée.

Copyright © 2016 Eyrolles.



Changements des programmes du premier étage d'une maison provençale.

Vous vous êtes renseigné un peu plus et avez découvert que cette maison fonctionne comme une machine qui, simplement par la conception de sa structure, assure une atmosphère confortable, quelle que soit la saison. En réalité, pour vos vieux jours, vous envisageriez un chauffage moderne, qui vous assure l'eau chaude. Alors vous avez demandé des devis d'isolation en précisant qu'il fallait vous expliquer le choix des matériaux et des procédés. La meilleure solution est d'isoler vos combles et ceux de l'annexe, et d'isoler les parois est, nord et ouest par l'extérieur tandis que la façade sud sera isolée (peu) par l'intérieur. Le professionnel qui a posé l'isolation a mis en isolation extérieure 20 cm de panneaux de laine de bois (tenus serrés entre des madriers de 22,5 cm de large sur 4,5 cm d'épaisseur), puis une lame d'air de 2,5 cm d'épaisseur et enfin 5 cm de panneaux de fibre de bois fixés sur les madriers. L'enduit à la chaux a été posé directement sur la fibre de bois. Les madriers sont fixés par des équerres sur la paroi, et ils reposent, en bas, sur 20 cm (de large) de polystyrène extrudé plantés à un mètre dans le sol. Le débord (de 2,5 cm) des madriers et les panneaux de fibre de bois (contreventant) ont permis de fixer une petite grille horizontale anti-rongeurs.

À l'est, de grandes fenêtres enfoncées pour profiter des premiers rayons de soleil. À l'ouest, un grand auvent pour protéger les pièces à vivre de l'irradiation excessive des après-midi d'été mais pour apprécier les couchers de soleil. Et, à l'est, pour prémunir la bâtisse du ruissellement de l'air humide : un garage désolidarisé de la maison.

Pour l'annexe, construite en parpaings de ciment, l'isolation est la même, si ce n'est que la lame d'air se situe entre les parpaings et l'isolant (à l'extérieur) : d'abord les parpaings, ensuite 1,9 cm de lame d'air, puis 0,6 cm d'OSB, puis 20 cm de laine de bois, puis fibre de bois et enfin le tout enduit à l'extérieur. Dans le premier cas, la lame d'air sert à amortir les chocs des rafales de mistral ; dans le second, elle permet de rompre les ponts hydriques entre le parpaing et l'isolant (assurant une meilleure longévité à l'isolant). Dans les deux cas, la masse thermique se situe à l'intérieur de l'isolant. Au sud, toutes les fenêtres sont à double vitrage (argon) et leur couche basse émissivité se trouve à l'extérieur du verre interne. L'isolation de la façade sud se fait par l'intérieur, elle se limite à une épaisseur de panneaux de fibre de bois fixés directement sur la face interne de la paroi. Ceux-ci sont couverts d'une peinture à la chaux aux tons orangés. Ils empêchent la sensation de paroi froide et augmentent légèrement le déphasage (ce qui n'est pas trop pénalisant puisqu'il fait plus chaud l'après-midi que le matin, surtout en hiver). Les panneaux servent aussi de supports aux meubles de cuisine (fixés sans trop abîmer la paroi). À l'extérieur, la façade sud est intégralement couverte d'une vigne vierge, sauf sous la grande tonnelle où les deux vignes donnent toujours du raisin de table. Toutes les fenêtres ont leurs volets bleus qui ferment si bien la nuit.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Un propriétaire antérieur avait ouvert de grandes baies au nord, face au mistral, Cette façade recevait aussi l'humidité qui descendait du flanc arboré d'une colline. On l'a protégée par un grand auvent, jusqu'au muret de soutènement.

Parfois, vous vous absentez pour un voyage lointain, surtout en hiver, quand les tropiques vous attirent. Alors vous fermez la maison et les volets. Vous ne mettez pas le chauffage en position hors gel. Entre l'ITI de la façade sud et l'ITE des trois autres, tous les ponts thermiques convergent vers le sud. Même les volets fermés, l'irradiation du soleil d'hiver sur la façade donne largement assez de chaleur à la structure du logis pour qu'il reste toujours hors gel.

6. Un cabanon des champs

Monsieur X a acheté un cabanon : une pièce couverte d'un toit de tuiles sur de vieilles poutres faites de branches fortes. Les murs avaient été édifiés avec la pierre locale (un reste de pierrier trônait à côté). Un peu de terre maintenait les pierres en appui et colmatait les fissures. Un cabanon des champs, sans âge, seul devant une belle vue, qui avait dû servir pour les estives, un ou deux siècles plus tôt. Les tuiles du toit, en place, assuraient l'étanchéité et un droit à construire.

Monsieur X était agriculteur : il produisait du blé en grandes quantités au nord de la Loire. Il avait dit vouloir investir dans les plantes tinctoriales en Provence, et avait donc acheté une terre agricole. Pour l'heure, la terre était sauvage. Monsieur X voulait transformer ce cabanon en séchoir à plantes. Les plantes tinctoriales devaient sécher doucement, à l'ombre mais pas dans un courant d'air, alors qu'un séchoir à figues devait profiter d'un courant d'air réglable. Mais il y avait une demande annexe : un jour, ce séchoir devait pouvoir être transformé en petite maison de vacances pour un couple. Le bâti devait donc prendre aussi en compte cette seconde demande.

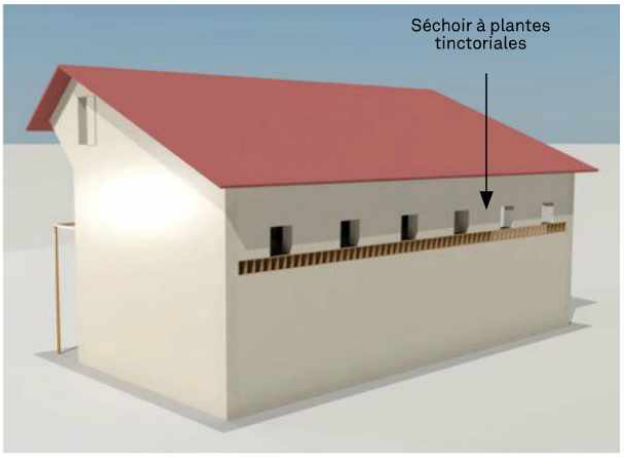
Loin de tout, le chauffage paraissait difficile, d'autant que Monsieur X ne voulait pas entendre parler de fioul ni de gaz, tout devait être naturel, structurel, bioclimatique.

Trois mètres au nord du cabanon, un gros rocher protégeait des rafales du mistral. Les dimensions extérieures de la bâtisse (environ 5,44 × 3,24 m) libéraient un espace intérieur trop petit pour une maison de vacances (4,40 × 2,20 m). Par contre, cela représentait un volume intéressant pour une chambre (avec placards). Les ouvrants étaient exactement au nombre de deux, on ne pouvait faire plus simple : une porte et une fenêtre, tous deux sur la façade sud. L'intérieur était spartiate : il n'y avait rien. Le sol était en terre battue, une pierre avançait un peu qui pouvait servir d'étagère, le reste n'était que murs de pierres mal jointes ; en haut, quelques traces d'un plafond de roseaux montés au plâtre qui avait disparu. Ce dénuement intérieur n'était même pas embelli par un tag, une porte ou une vitre. À l'est, juste à côté de la maison, au bord d'une coulée de roseaux, une ancienne citerne de pierre et glaise gardait un peu d'eau croupie sous un vigoureux figuier.

Que ce soit pour édifier un séchoir à plantes tinctoriales ou pour en faire une maison de vacances, il allait falloir agrandir la bâtisse. Elle était orientée plein sud. On allait la chauffer avec une serre. Les rayons solaires devaient donner sur la masse

Copyright © 2016 Eyrolles.

Irradiation de la façade sud du cabanon le 15 octobre à 13 h. D'octobre à mi-mars, le soleil d'hiver allait chauffer les quatre-vingts tonnes de pierres du cabanon tout le jour. La nuit, le cabanon allait chauffer la maison.



Prises d'air en façade nord du cabanon

thermique des quatre-vingts tonnes de pierres qui constituaient le cabanon.

La partie haute de la serre serait pourvue de grandes fenêtres à oscillo-battant et de petits ouvrants au nord pour permettre l'entrée d'air frais. Ainsi, on assurerait la ventilation passive nécessaire pour faire sécher les plantes tinctoriales.

Le cabanon, protégé par la nouvelle structure, serait pourvu d'un toit plat en béton, d'une grille sur la fenêtre et d'une solide porte qui, à leur tour, protégeraient les biens et les outils qui y seraient stockés entre deux récoltes.

Le peu d'eau disponible obligeait à un chantier le plus sec possible. On envisagea une structure bois, et pour que le bois ne vrille ou ne fende pas, la maison serait recouverte (sauf au sud) d'une lame d'air protégée par des panneaux de bois aggloméré. Au sud, à mi-hauteur de la façade, une vigne vierge devrait être arrosée depuis la citerne pour couvrir une pergola.

Le toit allait avancer largement pour que la serre reste au soleil tout l'hiver, mais à l'ombre tout l'été. Pour ne pas risquer que la furie d'un coup de vent du sud arrache cette avancée de toit, on allait la couvrir de panneaux d'OSB inclinés à 45°. Cette sous-face peinte en blanc allait, par son albédo, augmenter la luminosité sur les semis, en hiver.

Au-dessus de l'isolant, le toit aurait une ventilation traversante, tout l'été. Les deux volets, asservis par deux pistons à paraffine, se fermeraient tout seuls dès que la température des combles passerait en dessous de 37 °C. Sous les ouvertures de ventilation au nord, on avait prévu une rangée continue de carreaux de céramique (pour que les rongeurs ne puissent s'y introduire).

Sans ventilation, on aurait 25 °C dans la serre tout l'hiver. En été, la ventilation naturelle serait continue, à trois mètres de haut, chassant l'air chaud et n'incommodant pas les hommes au travail (ni les futurs vacanciers). Elle permettrait d'alimenter le séchoir à plantes tinctoriales et un séchoir à fruits.

7. Une maison de ville

Notre patrimoine bâti ancien représente aujourd'hui environ dix millions de logements, soit un peu plus que le nombre de foyers qu'il y avait en France en 1850. Les logements n'étaient pas occupés de la même manière : guerres, destructions pour remplacer par du neuf, maisons coupables de non-alignement et quelques écroulements... On

Copyright © 2016 Eyrolles.

estime que moins de 15 % des bâtiments habités en 1900 ont été détruits depuis lors, essentiellement lors de la Seconde Guerre mondiale. Le tiers du parc immobilier actuel a été construit avant la Première Guerre mondiale. Il se caractérise par une homogénéité de styles régionaux, chacun remarquablement adapté à son climat (bioclimatique).

Aujourd'hui, d'une façon générale, ce patrimoine est menacé par les nouvelles règles et par ce que des ingénieurs prétendent appeler « l'habitat traditionnel » : tout doit faire l'objet de normes. Or, par essence, on ne peut appliquer les normes du béton de ciment à des constructions conçues et construites avant son apparition.

La conservation de l'essentiel de notre patrimoine ancien montre, d'une part, que les Français sont plus frileux à détruire ce qui est en bon état que certains modernistes le prétendent, d'autre part, que le mode constructif de nos anciens était durable.

Chacun de ces dix millions de logements bénéficie des énergies naturelles, puissantes et répétitives que lui impose le climat dans lequel il baigne. Et ses besoins en énergie primaire sont infiniment moindres que ceux de nos bâtiments actuels.

L'habitat urbain joue de ressorts parfois différents de ceux des maisons isolées. Il est basé sur une économie de l'espace évidente. La mitoyenneté des maisons, leur protection au vent et leur exposition au soleil étaient primordiales.

Si vous avez acheté une maison de ville ou de village, il y a fort à parier que l'on a autorisé le bâtiment qui se trouve au sud à s'élever aussi haut que le vôtre. Auquel cas, s'il est proche, vous allez souffrir du froid et du manque de lumière. Le masque causé par votre voisin sud vous empêchera de profiter de la chaleur des rayons solaires d'hiver, vous profiterez seulement de ceux de l'été (quand il fait déjà trop chaud). Pourquoi ? Parce qu'un règlement

Dans les ruelles étroites, choisir de préférence une maison sans vis-à-vis en sud, ou bien suffisamment en retrait pour que la façade sur rue soit chauffée tout l'hiver. La façade arrière, sur cour (ou jardin), pourra être isolée par l'extérieur.

a autorisé tel quartier à construire à telle hauteur. La rue qui sépare vos deux maisons étant vraisemblablement plane, le bâtiment au sud masque celui qui est au nord. On a demandé à la personne qui a écrit ce règlement d'avoir une formation juridique, pas de s'intéresser à la bioclimatique.

Aussi, avant de faire l'acquisition d'un bâtiment de ville ou de village, il est prudent de s'assurer que la chaleur du soleil d'hiver (entre sud - 45° et sud + 45°) ne peut vous être ôtée.

Vous ne pourrez isoler par l'extérieur votre façade sur rue, puisqu'il y aura toujours un voisin ou un élu pour vous demander de respecter l'alignement des constructions de la rue. Si derrière votre maison il y a une cour, il vaudrait mieux que vous ayez acheté du côté nord de la rue pour que votre

Copyright © 2016 Eyrolles.

Cette cour, au nord d'une maison de ville a été aménagée en patio. En été, elle est couverte d'un vélum en toile tendue, ce qui la met à l'ombre (rafraîchissement) et en fait une grande pièce d'extérieur. En hiver, le vélum est rangé. La lumière qui se réfléchit sur le mur blanc assèche le patio et illumine les grandes fenêtres, apportant plus de luminosité dans le logement.

façade sud soit plus ensoleillée (écartement des bâtiments de la largeur de la voie) et que vous puissiez isoler votre façade nord du froid. Dans ce cas de figure, les ponts thermiques que vous allez créer en isolant votre façade par l'intérieur seront tous orientés vers le sud. Si, du fait du masque créé par vos voisins d'en face, le rez-de-chaussée ou le premier étage ne reçoit pas de rayonnement direct en hiver, placez un placard ou un rangement fermé à chaque coin de cette façade. Les côtés est et ouest seront protégés par vos voisins immédiats (qui représentent autant de pièces tampons pour votre maison de ville). Il n'y a pas lieu de les isoler, si ce n'est du bruit. Deux couches de carton croisées font généralement un isolant thermique bien suffisant.

Quant à la façade nord, vous l'isolerez par l'extérieur de 20 cm d'isolant. Il n'est pas nécessaire de prévoir des lames d'air, puisque la compacité du bâti dans les centres-ville anciens vous protégera du vent. Le toit sera évidemment très bien isolé (28 cm).

Votre rue est-elle dominée par de grands platanes ? Ne les valorisez pas trop : ils sont souvent malades, ils risquent d'être coupés et remplacés par de jeunes tiges.

La personne qui a mis l'asphalte sur le trottoir devant votre maison a sans doute été vigilante à ne pas la salir. Souvent, une fente d'un demi-centimètre de large longe toutes les maisons. L'eau de pluie, ruisselant sur la façade, va s'y engouffrer et descendre mouiller votre bas de mur, voire vos fondations. Soyez attentif à l'éviter. Édifier un petit bord en ciment, concave, qui renvoie l'eau de ruissellement sur le trottoir et vers le caniveau.

La nécessaire rénovation thermique des bâtiments existants n'est pas sans conséquences sur leur pérennité. L'application d'un système d'isolation, par l'extérieur ou par l'intérieur, modifie les mouvements d'eau et de vapeur d'eau au sein de l'enveloppe (murs, planchers, toits). Il apparaît que l'isolation par l'extérieur constitue l'option la plus sûre, lorsqu'elle est possible. Dans le cas contraire, l'isolation thermique par l'intérieur devra impérativement être accompagnée de la mise en œuvre d'un frein-vapeur (si possible, hygrovariable). Dans les deux cas, il faut que le système paroi/isolant assure une bonne migration de la vapeur d'eau de l'intérieur vers l'extérieur. Plus répandue en Allemagne qu'en France, l'isolation extérieure consiste à envelopper le bâti d'un manteau isolant. Les experts s'accordent à dire que les performances sont meilleures. Il existe cependant des types de besoins où l'isolation par l'intérieur s'impose.

Des inconvénients toutefois : une isolation par l'extérieur n'est pas adaptée à tous les types de façades : par exemple, celles qui sont ornées de sculptures, de frises... Et on ne peut l'appliquer sur un bâti ancien dont elle modifiera sensiblement l'aspect extérieur. Il est alors nécessaire

Copyright © 2016 Eyrolles.

Histoire politique des vieilles demeures

On impose aujourd'hui aux bâtiments anciens des chauffages trop puissants et des émissions de vapeur d'eau jamais envisagées dans l'histoire. On perce des parois homogènes de tuyaux ou de conduits et, trop souvent, on malmène leur parfaite régulation hydrique par des membranes en plastique, des goudrons ou des enduits étanches... Bref, parce qu'obnubilés par la modernité du ciment, nous procédons actuellement à une destruction violente de notre patrimoine bâti ancestral à coups de règlements inadaptés. Quand dix millions de logements ont résisté à des siècles, les œillères de certains de nos décideurs excités par des ingénieurs en béton risquent de causer plus de dégâts que deux guerres mondiales en quelques décennies.

On peut ne pas aimer que des bombes aient détruit des bâtiments, des villages ou des villes mais, larguées à 9 000 m d'altitude, ces armes étaient aveugles. Ce n'est pas le cas de certains de nos gouvernants : ils ne sont pas aveugles mais incultes malgré eux. Depuis la Seconde Guerre mondiale, il n'y en a que pour le béton. Il y aurait deux cent cinquante fois plus de revues dans le monde qui traitent de l'architecture en ciment, acier ou verre que d'habitat traditionnel, et peut-être dix mille fois plus de parutions ! Ce rouleau compresseur a imposé « la modernité architecturale ». Pratiquement tous nos décideurs seraient disposés à détruire une grange en pisé qui a survécu à deux ou trois siècles sous prétexte qu'elle ne respecte plus un alignement de façades. On souhaite des habitats durables ; on nous dit qu'ils doivent être économes en énergie, on prétend exiger le respect d'un style architectural... et on détruit, sans le moindre respect, des bâtiments qui ont résisté aux siècles (durables) en consommant très peu d'énergies (économes) dont aucune n'est d'origine fossile (écologique) et qui, par essence, respectent les styles architecturaux locaux. Et on les remplace par quoi ? Par des constructions qui utilisent en très grande quantité du ciment (la troisième source de dépenses énergétiques de la planète), du sable (dont on vit une pénurie mondiale) et de l'acier (assez énergivore aussi), qui polluent au point que tous les gouvernements de l'OCDE ont à leur agenda le problème majeur des déchets de chantier... Sous prétexte de remplacer du vieux par du neuf, on méprise ce qui a prouvé être économe et durable, et on prône ce qui n'est ni économe ni durable en lui demandant d'être tout de même économe et durable ! On marche sur la tête.

de consulter les règles d'urbanisme de la commune et d'obtenir un avis favorable de l'architecte des Bâtiments de France. Autre détail ayant son importance : les volets battants sont peu compatibles avec une isolation par l'extérieur, à cause du porte-à-faux des gonds dont le scellement se situe derrière l'isolant. Ce problème ne se rencontre évidemment pas avec une isolation intérieure.

Autre revers de la médaille : toutes les façades doivent être traitées en même temps, ce qui n'est pas le cas avec une isolation par l'intérieur qui peut être mise en œuvre pièce par pièce, en fonction de disponibilités budgétaires, par exemple.

Sachez enfin que l'isolation par l'extérieur est plus onéreuse : entre 50 et 75 € le mètre carré alors qu'elle est comprise entre 30 et 40 € le mètre carré quand elle se fait par l'intérieur.

Quelle que soit la solution retenue, si vous sous-traitez l'isolation de votre maison ancienne, n'oubliez pas :

- en isolation par l'extérieur : exigez l'isolation des linteaux, tableaux et appuis de fenêtre ;
- si vous faites remplacer vos fenêtres, les cadres devront sans doute être repris en maçonnerie de façon à utiliser des Compriband, et non pas de la mousse expansive ;

Copyright © 2016 Eyrolles.

- en isolation par l'intérieur : demandez des contre-cloisons en briques plâtrières, en Siporex ou en Fermacell (pas en BA13) ;
- en isolation par l'intérieur ou par l'extérieur : les supports des isolants doivent être des pièces de bois, pas des rails en aluminium ;
- en isolation par l'intérieur : le frein-vapeur doit être parfaitement continu, ce qui requiert une mise en œuvre très soignée au niveau des points singuliers (jonctions mur-mur, mur-plancher, mur-menuiserie, prises électriques, etc.), à l'aide de rubans adhésifs adaptés ;
- quelle que soit l'isolation choisie, en dehors de l'arrivée des fluides : aucun tuyau d'eau ne doit traverser la paroi isolée sans passer par une pièce tampon.

8. Parois et rénovation

Votre maçon habituel travaille certainement très bien le ciment. Il est souvent moins habitué à la chaux. Il appréciera qu'elle ne sèche que lentement parce qu'il aura beaucoup moins de déchets sur son chantier et parce que, à condition de maintenir sa surface humide, il trouvera très commode de pouvoir réaliser des reprises ou des corrections à volonté. Vous, qui habiterez dans la maison, apprécierez ses qualités antiseptiques et antibactériennes et surtout sa qualité principale en termes de confort : la chaux est étanche à l'eau ruisselante, mais perméable à la vapeur d'eau.

Votre maçon sera sans doute tenté par les produits « tout prêts », qui lui permettront d'utiliser de faibles quantités sans avoir à malaxer longuement ses mélanges à la chaux.

La chaux hydraulique (NHL) se conserve fort bien en seau, du moment qu'on laisse un film d'eau à sa surface. Son séchage ressemble apparemment plus à celui du béton, parce qu'elle est composée de chaux grasse mélangée à de la chaux maigre : sa première prise est rapide (l'argile qu'elle contient (la chaux grasse) sèche en perdant son eau à l'air). Le mélange ayant pris forme, il maintient le mortier en place jusqu'à ce que la seconde prise soit terminée (la chaux maigre durcit en absorbant le CO_2 de l'air). En appliquant la règle « maigre sur gras », elle fait un très bon joint ou une bonne sous-couche d'enduit. La chaux hydraulique confortera l'habitué des chantiers, puisque son usage est encadré par une norme européenne (EN 459-1). Elle convient pour les enduits ou les décors. En maçonnerie, la chaux hydraulique sert surtout à maintenir des pierres qui, elles, assureront la résistance à la pression. Elle est donc très utile en rénovation pour édifier ou réparer un bout de mur, reprendre des joints entre pierres, ou préparer une paroi que l'on va enduire.

Les chaux formulées (HL) sont des chaux additionnées de ciment (12 à 15 %) et d'adjuvant entraîneur d'air. Elles se manient à peu près comme un ciment onctueux. Le ciment confère une résistance relativement élevée (10 à 11 MPa après vingt-huit jours de séchage), et maintient la structure pendant que la chaux carbonate. Ces chaux formulées sont particulièrement faciles d'usage pour les sous-couches d'enduit et tendent à éviter les fentes de l'enduit. Comme les chaux hydrauliques, elles restent un peu moins perméables à la vapeur d'eau que la chaux aérienne.

La chaux aérienne (CL) est plus exigeante. Elle est travaillée par des artisans spécialisés, parce que son séchage est nettement plus délicat et contraignant. Elle apporte, à terme, le meilleur confort et la meilleure solidité des parois. Votre

Double vitrage en rénovation

La puissance perdue par 20 m² de bonnes fenêtres à simple vitrage, s'il fait 20 °C à l'intérieur et 0 °C dehors est de 2 200 watts ! La puissance perdue à travers 20 m² de paroi d'une maison ancienne s'il fait 20 °C à l'intérieur et 0 °C dehors est de moins de 80 watts.

Copyright © 2016 Eyrolles.

maçon la connaît sans doute, mais ne l'emploie que pour les enduits. Plus blanche que la chaux hydraulique, elle permet des couleurs plus délicates.

Votre maçon saura aussi utiliser des enduits isolants à base de chaux qui sont commercialisés « prêts à l'emploi » et qui ne demandent pas une vigilance particulière de la phase de séchage. Parmi ceux-ci, les enduits « chaux-chanvre » et les enduits « chaux-argile » :

- Les enduits chaux-chanvre, composés de paille de chaux et de chaux aérienne, sont des semi-isolants qui affichent un $\lambda = 0{,}11$ (pour faire simple : 3 cm d'enduit chaux-chanvre isolent un peu mieux que 1 cm d'isolant). Ils sont fongicides, stables en volume à l'humidité, isolants phoniques et régulateurs hygrothermiques. Ils donnent d'excellents résultats contre le salpêtre. On peut les utiliser à l'extérieur comme à l'intérieur d'une paroi, car ils préparent bien un mur à recevoir un enduit. Les architectes d'intérieur apprécient de plus en plus leur texture dans la décoration des maisons anciennes.
- Les enduits chaux-argile sont d'excellents semi-isolants : $\lambda = 0{,}06$ (1,5 cm d'enduit chaux-argile isole autant que 1 cm d'isolant). Ce sont de remarquables régulateurs hygrothermiques : ils sont constitués de chaux aérienne, d'argile et de perlite. Utilisés à l'intérieur d'un logement, ils accrochent très bien les enduits, amortissent les bruits et apportent une bonne sensation de confort. Ils sont parfaits dans le cas de reprises de parois composites « pierre-terre-pierre ».

Votre maçon s'est sans doute déjà servi de billes de perlite, pouzzolane ou verre expansé pour isoler un conduit de cheminée. Il ne sera donc pas décontenancé par les billes de graphite maintenant disponibles sur le marché. Elles ont l'avantage d'être particulièrement légères tout en étant ininflammables. Elles sont notamment recommandées pour remplir des espaces vides, surtout lorsque ceux-ci autorisent peu de poids (comblement d'un plancher, par exemple). Elles isolent des bruits et des vibrations.

Mais, à moins qu'il ne soit aussi cuisinier, votre maçon ne connaît sans doute pas certains isolants plus « exotiques » comme le maïs Butterfly. Il a vraisemblablement déjà mangé du maïs Palomino qui, lorsqu'il est chauffé à une certaine température, en milieu humide... donne du pop-corn, c'est-à-dire du maïs expansé avec formes un peu ouvertes et variables. Les fabricants d'isolants ont repéré une autre espèce de maïs, le Butterfly,

Si l'on souhaitait repartir des restes de cet ancien mur de refend, on utiliserait évidemment un habillage tenu à la chaux. En l'occurrence, une cloison (et un placard) partirait de l'empreinte de ce mur de refend, entre une chambre et une salle de bains : un enduit « chaux-argile » amortirait les bruits et régulera les pics d'humidité.

Copyright © 2016 Eyrolles.

lequel donne aussi un pop-corn mais à peu près rond. Lorsque la chaleur et l'humidité combinées ont fait gonfler un grain de maïs Butterfly, il a accumulé entre ses cellules d'amidon trente fois son volume en air. C'est un isolant très léger et aussi efficace thermiquement que le meilleur des isolants synthétiques (le polyuréthane) ! Le problème est qu'il attire les rongeurs. On le traite donc au sel de bore, ce qui permet d'éloigner ces nuisibles et de le rendre peu inflammable. On peut l'utiliser, par exemple, pour isoler des combles (s'ils sont parfaitement protégés de la pluie).

Si vous souhaitez simplement améliorer l'efficacité énergétique de votre logement, il y a quelques solutions simples qui tiennent du bricolage. Le principe reste que les petits ruisseaux font les grandes rivières et que, dans le domaine de l'isolation plus que dans beaucoup d'autres, « le diable se cache dans les détails ». Chaque dixième ou centième de degré gagné va s'ajouter aux précédents.

En voici quelques exemples :

- En Provence, l'ombre se révèle particulièrement importante en été. Plantez un arbre caduc devant une façade sud ou ouest. Achetez-le déjà grand. Il protégera votre mur pendant la canicule, mais laissera passer les rayons d'hiver. Le micocoulier et le figuier apportent une ombre très fraîche. Leurs racines ont le défaut d'apprécier les canalisations d'eau. Si les platanes n'avaient pas été contaminés, vous les auriez choisis. Le catalpa fait, très vite, une ombre importante. Malheureusement, il aime les terrains gras et se fait coucher par les vents violents. Pour freiner le mistral, nos agriculteurs ont toujours préféré les cyprès et les peupliers.
- Si votre toit apporte de l'ombre à la façade sud, il se peut que celle-ci ne soit pas couverte jusqu'au sol. Un banc contre le mur protège une surface égale à 50 cm × la longueur de la façade (soit quelques mètres carrés) de l'irradiation. Des plants de rosiers seront aussi efficaces. Des pots de plantes que vous déplacerez en hiver, auront le même effet.
- Ne placez jamais de lierre sur un mur : il l'abîmerait. Par contre, la vigne vierge couvrait la majorité des façades de Provence. Choisissez une espèce à longs pédoncules sur les faces abritées du vent : elle apportera plus de fraîcheur, puisque l'air circulera derrière les feuilles.
- Les claustras d'extérieur protégeront vos fenêtres et même vos murs sud. Choisissez-les à lames larges et blanches. Calez celles-ci sur 45°. En été, les claustras apporteront leur ombre sans chauffer. En hiver, ils laisseront passer l'irradiation.
- En hiver, les rayons qui seront reflétés par le sol réchaufferont votre mur. Profitez de l'effet albédo : l'espace qui se trouve au sud et à l'ouest de votre maison reflète la lumière vers la maison. L'angle incident ne sera pas le même pendant la saison. Il faut donc veiller à ce que le sol, à proximité immédiate des murs, réfléchisse peu la lumière. Herbe ou massifs de feuillus sont les plus efficaces. Au-delà, privilégiez les surfaces qui réverbéreront les rayons d'hiver sur le bâti : dallages clairs ou graviers.
- Un auvent représente une étape plus ambitieuse. S'il est appuyé à la façade, vous risquez d'accumuler de l'air chaud contre le mur, ce qui est une mauvaise idée en été. D'anciens écrits (la Bible) précisent que les bastaings d'un auvent ne doivent pas toucher la structure. L'auvent idéal doit donc être autoportant, le haut de son toit se glissant quelques centimètres en dessous de celui de la maison. En l'été, il devrait être suffisamment haut et avancé pour que son ombre lèche le bas du mur de juin à août.
- Si vous voulez mettre une treille sur un châssis métallique, n'oubliez pas d'isoler le métal du mur. Au pire, vissez-le sur un morceau de bois qui, lui, sera fixé au mur.

Copyright © 2016 Eyrolles.

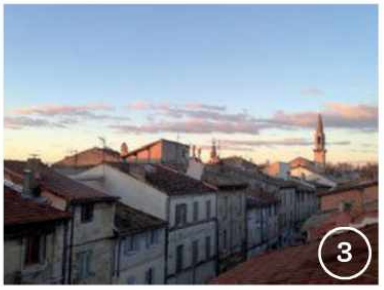
- La plupart des maisons ne sont pas accolées à leur limite nord. S'il y a là un mur de séparation, vous pouvez déjà en peindre la face sud en blanc. Cela apportera un peu de luminosité aux plantes qui poussent à l'ombre de la maison. Elles pousseront plus densément côté nord, ce qui freinera un peu plus le mistral. Certains ont fixé des miroirs sur ce mur.
- Chaque fois que vous maniez du métal sur une façade, vous devez penser « pont thermique ». Si, par exemple, vous fixez sur la façade des équerres qui maintiendront les bastaings qui supporteront l'isolant : mettez une rondelle en plastique sous chaque tête de vis, glissez une chute de carton entre l'équerre et la paroi, utilisez des en chevilles plastique à collerette...

8. Quelques exemples

- La grange à calèches (photo 1), sans détails architecturaux particuliers, pourra aisément être isolée par l'extérieur du fait de la masse thermique des parois. On peut envisager d'y installer un salon cathédrale (4,50 m sous plafond, 7,30 m de long, soit le rapport du nombre d'or) ou deux niveaux ou encore une mezzanine. La façade est, aveugle, est proche d'une rue et reçoit en hiver un air frais et humide. À l'issu de la rénovation, elle devra être relativement étanche à la vapeur d'eau (en tout cas en son pied) et pourra être protégée par un mur de clôture de 2 m de haut au moins à la place du grillage existant.
- Cette rénovation lourde (photo 2) consistait à isoler la maison principale (par l'extérieur, 20 cm de panneaux de fibres de bois montés en quinconce) et à traiter les ponts thermiques causés par la tour (non isolée). Celle-ci abrite un escalier et une chambre d'amis (pour l'été). Le hangar au nord a été transformé en trois appartements en duplex où on n'a isolé que le toit : 28 cm de ouate de cellulose soufflée en caissons, dans les combles. L'escalier a été isolé par l'intérieur (10 cm de ouate de cellulose projetée derrière un habillage en lambris). Au sud, on a gardé le pont thermique linéique entre l'isolation par l'extérieur de la maison et l'isolation par l'intérieur de la tour. À l'ouest, l'isolation par l'extérieur a débordé au maximum sur la tour.
- L'acheteur de la maison qui dépasse les toits (photo 3) a pu augmenter la surface habitable en montant le toit pour y aménager une chambre avec salle d'eau. Si cette chambre a une vue de rêve, elle est désagréable à vivre. L'extension a été faite en parpaings de béton, isolés par l'intérieur avec de la laine de verre (10 cm) et des panneaux de plâtre. Les extrémités des poutres apparentes dépassent du mur et pourrissent. La pièce, plus haute que le vélum des toits de la ville, reçoit le mistral de plein fouet. Son isolation la protège très peu de la canicule et la fenêtre de la salle d'eau, au nord, apporte beaucoup de froid, en hiver. On a dû traiter les extrémités des poutres, recouvrir les murs de panneaux de fibre de bois (enduits) et placer une paire de volets transparents (en polycarbonate) devant la fenêtre de la salle de bain. Le plafond a été recouvert (entre les poutres apparentes) d'un isolant mince réfléchissant et d'une toile de jute épaisse agrafée.

1

2


3

Copyright © 2016 Eyrolles.

13| Autoconstruction

1. La conception bioclimatique

Ce chapitre vous est dédié, à vous tous qui constatez qu'il fait toujours plus froid la nuit que le jour et que, si l'on tire parti de ce que le climat nous impose, on peut se construire une maison peu gourmande en énergie et très agréable à habiter. Dans notre monde normé, l'autoconstructeur fait encore exception. Tout est fait pour le décourager : le voisin qui exige une note de calcul, une mairie qui demande à voir une garantie décennale ou le vendeur de matériaux qui ne pratique un tarif quantitatif que pour les entreprises. Mais on ne peut arrêter un flot : il y a de plus en plus d'autoconstructeurs. Ils sont plus de mille à terminer leur maison, en France, année après année. Leurs motivations sont relativement variées :

- l'excellent bricoleur qui préfère mettre ses connaissances et son amour du travail bien fait à son propre service pour ne pas risquer de pester indéfiniment contre les malfaçons d'ouvriers ;
- le couple désargenté qui dédie ses soirées et ses vacances à construire le rêve de sa vie (comme d'autres construisent leur bateau dans leur jardin) ;
- le passionné qui souhaite une maison construite selon des principes qui ne correspondent pas encore aux expériences des professionnels du bâtiment ;
- le raisonnable qui sait que le coût d'une maison en paille ou en torchis dépend plus de la main-d'œuvre, que ses amis et lui pourraient fournir, que des matériaux de construction ;
- celui à qui son travail fournit plus de temps libre que de fortune et qui, dans la conjoncture actuelle, préfère créer de la richesse plutôt que de dépenser en divertissements ;
- celui qui pense « durable » et veut se construire un nid douillet en employant les matériaux et les procédés les moins énergivores possibles.

En revanche, les profils des autoconstructeurs présentent des qualités communes, à croire que celles-ci sont essentielles pour se lancer dans la folle aventure de la construction de sa maison :

- du courage et de la ténacité ;
- une curiosité affirmée ;
- de l'endurance physique ;
- le goût du travail bien fait ;
- un esprit généreux et un cœur large.

Un autoconstructeur cherche à faire le mieux possible, le plus efficacement possible. Or il sait qu'il ne sait pas tout, donc il cogite souvent. La caractéristique commune à tous les autoconstructeurs est cette propension à réfléchir avant de faire chaque nouveau geste. Or construire une maison représente un immense projet dans une vie. Celui-ci commence forcément par l'étape la plus difficile de la bioclimatique : la conception.

Une démarche bioclimatique réussie résulte de la bonne compréhension du climat local, et du discernement des interactions des bâtiments avec celui-ci. L'essentiel a déjà été découvert par nos anciens. La principale difficulté de la bioclimatique d'aujourd'hui réside dans la complexité de

Copyright © 2016 Eyrolles.

la conception des bâtiments, avec nos matériaux actuels, dans le cadre des réglementations et des lois en vigueur.

2. Autoconception

Vous avez défini vos besoins. Exemple : une maison avec trois chambres, un garage, une piscine, un potager, un jardin, une surface habitable de 140 m^2, etc.

Le terrain

Vous cherchez un terrain qui ait une taille suffisante pour satisfaire vos besoins, mais pas plus. Il devra avoir une exposition sud dégagée et vous vérifierez que cette exposition ne risque pas d'être masquée. Vous refuserez tout terrain sous ou à proximité d'une ligne à haute tension. Ce terrain devra idéalement se trouver à proximité de votre lieu de travail, entouré par d'autres terrains construits, à proximité des services qui vous seront nécessaires et vous vérifierez que des transports en commun le desservent.

Vallées ou collines

Si votre maison se trouve en creux de vallée, vous profiterez du rafraîchissement d'un puits ou d'un forage, mais vous souffrirez des inversions thermiques en hiver où il fait nettement plus froid (2 à 9 °C) et humide (brouillards le matin, donc peu d'irradiation). Si votre maison se trouve en haut d'une colline, vous risquez de vivre éloigné de votre travail, des commerces, des hôpitaux ou des écoles. Mais vous serez nettement mieux chauffé par le soleil d'hiver et vous souffrirez moins de l'humidité. Le choix du terrain est donc affaire de compromis. Idéalement, vous vivrez cinquante mètres au-dessus de la vallée, à proximité d'une agglomération importante, dans un village (commerces de proximité et école primaire) et sur le flanc de la colline donnant au sud (l'adret).

3. L'inversion de température

Les villages ancestraux s'accrochaient aux collines, perchés juste au-dessus des plaines agricoles. On remarque que plus les amplitudes thermiques sont faibles en hiver, plus ces villages se trouvent bas dans la pente. Chacun de leurs habitants avait appris la grande peine qu'il y avait à monter en de tels lieux, surtout lorsque la sente était raide et pierreuse et que l'on retournait au village chargé.

54 kilomètres par jour, pendant cent ans

Supposons que nous allions construire des bâtiments destinés à durer cent ans. Une étude, présentée à Batimat en 2009, a montré qu'un seul aller-retour par jour, en voiture, à 54 km de distance, consommait trois fois plus d'énergie qu'une maison BBC normande de 100 m^2. Ces deux fois 54 km de trajets quotidiens pendant cent ans dépassent à peine l'énergie grise nécessaire pour élaborer tous les matériaux structurels du bâtiment (isolant = laine de verre ou polystyrène). Le coût de construction d'une maison de 100 m^2 correspond à peu près à ce qu'il en coûterait aujourd'hui de faire deux fois par jour ce trajet aller-retour à 54 km de distance pendant cent ans. En d'autres termes : si votre maison se trouve à 54 km de la ville, si monsieur et madame travaillent à la ville, si chacun dispose d'une petite voiture (citadine) et ne fait qu'un seul aller-retour par jour, si toutes les courses, déposes et reprises des enfants à l'école, chez le médecin, cinéma... se trouvent sur le trajet, s'il n'y a aucun imprévu qui obligerait à prendre sa voiture, et s'il n'y a jamais d'embouteillage sur cet itinéraire, alors l'énergie nécessaire au transport quotidien aura coûté en cent ans l'équivalent financier de la construction d'une autre maison de 100 m^2. Si vous choisissez de vivre en pleine campagne, loin de tout, soyez conscient que votre isolement vous coûtera cher. Il peut aussi avoir plus d'impact sur le globe que le mode constructif de la maison, et il peut être déterminant dans la valorisation de votre bien immobilier.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Normalement, dans une région accidentée, la température diminue à mesure que l'on s'élève en altitude (de 0,5 °C pour chaque 100 m de dénivelé). Or il arrive que cette variation thermométrique s'inverse et que les couches d'air inférieures soient plus froides que les couches supérieures. Pour que ce phénomène se produise, il faut que le refroidissement nocturne soit particulièrement rapide et que les couches d'air ne soient pas agitées par le vent. C'est fréquemment le cas dans l'arrière-pays provençal en hiver, lorsque le ciel est découvert. L'inversion thermique s'accompagne d'une différence d'hygrométrie importante. L'air froid et humide colle à la surface humide (cours d'eau ou verdure) en fond de vallon, alors que l'air chaud, plus léger, se glisse au-dessus. L'air froid et humide se condensant plus, une très forte rosée se dépose sur les champs. L'air chaud, au-dessus, baigne les villages perchés. Alors que les pentes sont illuminées dès le lever du soleil, les fonds baignent pendant plusieurs heures dans un brouillard dense, qui ne se dissipe que lentement. La différence de température entre le creux de vallon et le village situé cinquante mètres plus haut varie selon les configurations de terrain. Généralement comprise entre 2 et 4 °C, elle peut atteindre 9 °C (à Brantes, dans la Drôme). Pour exagérer le trait : au plus froid de l'hiver, les champs sont bien arrosés tandis que les habitants se chauffent au soleil. Nos anciens exploitaient au mieux ces deux microclimats distincts, distants de seulement cinquante mètres d'altitude.

On comprend qu'en région méditerranéenne l'exposition soit encore plus importante qu'en montagne. Le paysan provençal connaissait son climat local : il privilégiait les fonds de vallée parce que la rosée y arrosait plus ses cultures et il y freinait le vent pour que la bonne terre ne soit pas asséchée ou emportée par le mistral ; il préférait vivre accroché à la pente, ses fenêtres tournées vers l'irradiation du soleil d'hiver et son village tournait le dos au mistral pour que celui-ci glisse sur le vélum de ses toits presque plats. Il privilégiait l'humidité pour ses cultures et la chaleur d'hiver pour sa maison.

Les Ligures et les Voconces, nos prédécesseurs, faisaient déjà de même. Vous vous rendez souvent sur ce terrain, parlez avec vos futurs voisins et prenez des renseignements (carte des vents de l'aéroport le plus proche, diagramme des températures de la commune, irradiation à la base météo la plus proche, etc.). Vous dessinez, sur une image satellitaire, les apports climatiques qui agissent sur ce terrain. Bref, vous commencez à comprendre le microclimat qui baigne ce terrain.

Si vous disposez d'un relevé réalisé par un géomètre, vous dessinez sur un logiciel 3D le plan du terrain et faites une élévation de tous les points dont le géomètre a défini l'altitude. Vous reliez ces élévations, ce qui vous donne un plan simplifié en trois dimensions de votre terrain.

Relevez tous les « masques » qui vous cacheront le soleil ou vous protégeront de l'humidité ou du froid ; comparez avec les influences climatiques subies par ce terrain ; imaginez votre terrain, sa vue, les espaces dédiés au jardin, aux arbres, aux véhicules ; placez le volume de la maison ; réfléchissez encore, rêvez, imaginez des améliorations : par où glisseront l'eau de ruissellement, l'humidité, le froid ? Où devrait se situer le centre de vie l'été, l'hiver ? D'où viendra le bruit ? Par où pourraient passer les fluides, etc. ?

Le logis d'hiver

Vous dessinez un cube composé d'un rez-de-chaussée et d'un étage, qui sera la base hivernale de votre habitat. Accordez une épaisseur de 50 cm aux parois de ce cube. Vous prenez en compte toutes les obligations réglementaires locales et tentez d'insérer ce cube sur le plan 3D de votre terrain. Une fois que l'emplacement du cube vous paraît satisfaisant, tentez de placer les autres

Copyright © 2016 Eyrolles.

besoins que vous aviez définis (piscine, garage, etc.). Pour ce faire, vous garderez à l'esprit que le cube doit garder une orientation sud dégagée en hiver entre 45° à l'est et 45° à l'ouest du sud. Vous vérifiez que les arbres persistants du terrain que vous voulez conserver ne masqueront pas cette orientation. Si le terrain comporte un arbre caduc et a fortiori s'il s'agit d'un platane de haute souche, vous tenterez de placer le cube à l'ombre (au nord) de cet arbre.

Si votre construction mesure moins de 170 m^2, vous pouvez déposer votre permis de construire vous-même sans architecte, bien que vous auriez sans doute besoin de son expérience et de son savoir-faire technique, esthétique et volumétrique des constructions.

4. L'espace habité

Avant de consulter un architecte, vous placez les volumes des espaces supplémentaires que vous désirez autour de ce « cube ». Partant de la voie d'accès qui vous est sans doute imposée, vous dessinez autour de votre cube les constructions (garage, pièces d'été, piscine) de façon qu'elles protègent le cube des excès du climat (vent dominant, soleil des après-midi d'été, etc.). Vous déterminez les influences climatiques qui vous posent encore problème. Vous dessinez ensuite de nouveaux végétaux (arbres hauts, haies végétalisées, etc.) pour tenter d'y remédier.

Vous définissez un plan approximatif de l'intérieur de la maison (zone de sommeil/zone de vie, zones humides/zones sèches) et dessinez les ouvrants du cube. Vous tentez de faire précéder la porte d'entrée d'un sas de 3 m de long, vous mettez des fenêtres dans chaque pièce et un maximum au sud, vous placez les autres fenêtres en prévoyant une petite fenêtre au nord à chaque étage, qui alimentera vos ventilations traversantes. Vous prévoyez une zone fraîche qui baignera ces fenêtres nord en été (ombre permanente, piles de bois de chauffage, arbustes persistants...). Si votre façade ouest doit comporter des fenêtres, placez une pièce tampon (salle extérieure d'été) ou vérifiez qu'un arbre même persistant protège leur vitrage au-delà de sud + 45° ouest. Notez que les fenêtres en est sont généralement favorables, car elles apportent la chaleur des rayons du soleil levant juste après une nuit fraîche. Dessinez les dernières pièces tampons : le toit avec ses combles et la cave avec ses vides sanitaires et l'emprise des fondations. Au-delà des espaces habitables l'hiver (de votre définition de besoins), n'hésitez pas à envisager des espaces non chauffés que vous habiterez en été, voire dix mois sur douze mois en Provence.

Le terrassement

Vous pouvez maintenant dessiner le terrassement de votre terrain. Placez les végétaux qui ont un intérêt bioclimatique, évitez toute surface claire réfléchissante au-delà de sud + 45° ouest. Vous avez tracé (éventuellement) cave, vide sanitaire, auvents, arbres actuels et frondaisons futures... Prévoyez que la zone fraîche immédiatement au nord de la maison doit être (au moins) légèrement surélevée et que l'air frais qui s'y accumulera en hiver puisse être déversé plus bas (loin du cube).

Tous les niveaux sont dessinés sur vos plans ou votre logiciel 3D, les végétaux nécessaires sont placés, les pièces annexes aussi, autour du cube. Vous reprenez votre « carte des contraintes climatiques » et surlignez tous les segments de façade pour lesquels vous n'avez pas encore trouvé de solution idéale.

Vous allez rencontrer une personne compétente en matière de construction, un architecte ou un maître d'œuvre, et allez lui exposer vos idées. S'il s'avère qu'il y a une impossibilité, vous devrez reprendre votre copie et redessiner sur votre logiciel en 3D.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Maison intégralement isolée par l'extérieur. L'isolation est masquée par l'habillage de pierre des façades (obligatoire dans cette commune). Les principaux ouvrants donnent au sud. La maison a été placée de telle façon que les deux grands pins la protègent du soleil des après-midi d'été.

Une fois que vous aurez calé la latitude de votre terrain sur vos plans ou sur votre logiciel 3D, vous pourrez simuler les ombrages des débords de toit sur les façades ou des masques solaires. Cela vous conduira certainement à quelques ajustements dans votre conception de la maison et de ce qui va l'entourer. Dans un premier temps, vous négligerez les végétaux. Vous savez pourtant qu'ils seront essentiels dans votre projet. Un arbre apporte de l'ombre, fournit du bois, pompe de l'humidité, génère de l'oxygène à partir du CO_2... et les fruitiers vous offriront leurs fruits. Ensuite, une fois la construction validée, vous intégrerez les végétaux, il vous faudra imaginer leur croissance : vous les simulerez à deux, cinq, dix, voire cinquante ans après la construction.

Si vous envisagez une phyto-épuration, dessinez son espace, imaginez la vue qu'elle propose. Où pourriez-vous placer des panneaux photovoltaïques ? Une éolienne ? Le compost ? Votre poulailler ? D'autres souhaits ? Induiront-ils une gêne pour vos voisins ? Devez-vous en parler avec eux ? avec la mairie ? etc.

Validez votre premier projet. Il comporte un espace de vie d'hiver accolé à un espace de vie d'été (le point commun étant généralement la cuisine), des zones de nuit (chambres et salles d'eau), etc. Il respecte votre définition de besoins en tout point.

5. Les contraintes climatiques

Déterminer, pour chaque cas, les contraintes qui s'y appliqueront (bords de fenêtre, avancée de toit, etc.). Tentez de trouver des solutions.

Par exemple : vous souhaitez une grande fenêtre pour votre salle d'eau au nord. Pouvez-vous l'abriter du vent avec un mur ? Un mur de patio ? Y a-t-il un intérêt à ce qu'un mur latéral du patio se prolonge dans un mur du cube (pont thermique choisi) ? Sans doute que non, mais dans votre cas particulier ? Pouvez-vous la protéger par une haie de cyprès, ou un massif de lauriers fleurs, ou une haie de bambous ? Ou construire un mur en limite de terrain ? Le couvrir de briques creuses placées sur leur chant ? Pouvez-vous placer votre pompe à chaleur (PAC) dans ce patio ? L'abriter du froid nocturne par un toit ? Si c'est le cas, par où passeront vos ductes ? Par où écouler l'air froid qui s'accumulera dans le patio en hiver ? Y a-t-il une pente naturelle que l'on puisse utiliser ? Où débouche-t-elle ? Pour garder cet air frais nocturne en été, peut-on fermer une porte ? Où la situer ?

Si votre terrain est en pente et que vous avez dessiné des restanques, y en aurait-il une orientée plein sud dont le prolongement du mur pourrait préchauffer une pièce tampon ou un mur capteur ? Cette étape est la plus complexe. Vous allez tourner vos plans ou votre modélisation 3D dans tous les sens. Vous allez trouver des solutions, puis d'autres qui remettront en cause ce que vous croyiez acquis. Bref, vous allez considérer que chaque point singulier de chaque façade vit un microclimat particulier. Vous allez définir ce microclimat et ses apports de chaleur,

Copyright © 2016 Eyrolles.

de fraîcheur, d'humidité... au long des quatre saisons. Chacun de ces points singuliers va recevoir (ou endurer) l'influence de son microclimat propre tout au long de son existence, les éventuels micro-apports énergétiques se répéteront donc durant des années (voire un siècle) à chacun de ces points. À ce stade, il ne s'agit plus de traiter les grands équilibres thermiques du bâtiment mais de définir les questions que posent une multitude de détails : un angle de toiture qui reçoit plus de vent que les autres, le coin d'une fenêtre qui risque d'accumuler beaucoup d'humidité, une porte plus exposée que les autres à la poussière, etc.

Vos premières décisions seront vagues. À mesure que vous allez les affiner, vous améliorerez la bioclimatique de votre maison. Supposons, par exemple, qu'une coulée de vent qui balaye la piscine d'un voisin nord soit dirigée vers une porte de votre maison, au nord-est. La porte se trouve au nu intérieur, donc enfoncée d'une quarantaine de centimètres dans le mur. Vous pouvez décider que cette embrasure sera peinte avec une peinture glycérophtalique. Vous pouvez aussi prévoir un arbuste en amont. Réfléchissez aux informations dont vous disposez. Vous savez que le sol creuse un fossé entre le voisin et cette porte et que la terre y est plutôt humide, aussi vous pensez qu'il serait bon de l'assécher. La vue de ce côté-là ne vous intéresse pas, et votre voisin vous surplombant légèrement pourrait voir vos allées et venues, ce que vous ne souhaitez pas particulièrement. Vous pourriez alors construire un mur de clôture élevé, mais ni le voisin ni la mairie n'en seront satisfaits. Les règlements vous interdisent de planter un arbre à moins d'un mètre de la limite de propriété. Bref, vous décidez de planter une herbe haute en limite de propriété qui freinera le vent et qui asséchera la terre : vous mettrez une haie de bambous épaisse de près d'un mètre (vous en entourerez la base d'un ruban continu de métal d'une quarantaine de centimètres de haut, enterré aux trois quarts de façon que la haie reste contenue à sa place). Si vous retenez cette solution, puisque les bambous exigent beaucoup d'eau, il vous reste à déterminer comment vous pourrez l'arroser en été : disposez-vous d'une réserve d'eau en amont ? Si vous souhaitez que ces bambous vous assurent un ombrage sur la porte les après-midi d'été, vous les choisirez hauts. Sinon, vous planterez un arbre devant, qui sera à l'ombre de la maison le matin, et qui apprécie les sols un peu frais et un soleil d'été fort, et que vous puissiez former (abélia, acer, camélia, cattleya, magnolia, néflier, prunus...).

L'autre remise en question étant : est-ce que la porte est bien placée à cet endroit ? Est-ce qu'il n'est pas plus intéressant de protéger la façade du vent et de l'humidité par une lame d'air ventilée, et de profiter de cette humidité pour y placer un potager ou... ? Vous allez tenir ce type de raisonnement cent fois, trouver autant de solutions dont chacune apportera sa dose (importante ou minuscule) de bien-être à votre maison. Pour pouvoir valider votre projet, il doit être structurellement durable.

Sas et ponts thermiques

Le cube représente votre volume isolé. Grâce à la modélisation en trois dimensions de votre projet, vous le tournez dans tous les sens, sans aucune interruption.

Vous allez maintenant tenter de placer les arrivées des fluides (eau, gaz, électricité) et les sorties (accès au tout-à-l'égout ou à la fosse, électricité du réseau extérieur, sortie d'air de la ventilation...) en faisant en sorte que tous les percements de la paroi isolée passent par une pièce tampon, c'est-à-dire un volume artificiellement tempéré. C'est un exercice difficile, la solution la plus simple consistant à placer de petites cabanes autour des arrivées et des sorties de fluides que vous aviez imaginées, ce n'est pas nécessairement la plus esthétique.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Nous tenons pour acquis que la porte d'entrée donne sur un sas ou une petite pièce tampon. Vous pouvez imaginer, par exemple, que le tuyau de sortie vers le tout-à-l'égout passe dans une espèce de vide sanitaire d'une cabane à outils en bois attenante à la maison.

Par contre, si vous avez prévu que les fluides arriveraient par une pièce tampon accolée à la machinerie installée sous votre abri de piscine, il y a erreur : cette zone est chauffée en été par le moteur de la pompe, mais froide en hiver (pompe arrêtée et humidité du lieu).

En règle générale, on constate que les arrivées des fluides se font souvent par un petit volume au fond du garage ou une remise accolée au bâtiment. Sur les terrains en pente, certains concepteurs se servent de l'inertie du sol pour faire déboucher les réseaux par un grand placard couvert d'un toit végétalisé (précédé d'une poterne voûtée de style très provençal).

La sortie de la ventilation se trouve presque forcément en partie haute, aussi on utilise très souvent le volume des combles (rien n'interdit de prévoir une espèce de coffre dans les combles, à la sortie du cube, plus ou moins isolé contre la chaleur, par lequel passera la gaine de ventilation avant de déboucher dans l'air des combles). Nous verrons plus loin qu'il est souvent intéressant de prévoir une entrée d'air frais située à proximité de la sortie d'air vicié.

Vous avez défini un projet de la maison qui vous semble abouti. Avant de vous attaquer aux plans détaillés et de dessiner les détails importants, il vous faut valider votre projet thermiquement.

Aussi, vous allez voir un thermicien, qui va simuler votre projet. À cette occasion, vous noterez peut-être que certains compromis que vous aviez acceptés s'avèrent très coûteux en énergie. Si les résultats sont bons (et que vous avez atteint un excellent Bbio), demandez-lui d'éditer son étude. Elle vous sera exigée pour déposer votre permis de construire (depuis la réglementation thermique 2012).

6. Chantier

Une fois la maison définie, il vous faut imaginer votre chantier. Dans quel ordre allez-vous vous y prendre ? Où manœuvrer les camions ? Où placera-t-on les machines ? Où entreposer les matières premières et dans quel ordre ? Où seront les outils ? Etc. A priori vous devrez prévoir un engin ou un système qui permette de monter les matériaux jusqu'à hauteur du toit, en tout point du toit (quitte à le louer lorsque le besoin s'en fera sentir).

Si son bien n'est pas destiné à la revente mais bien à son usage personnel, un autoconstructeur peut se permettre des techniques qu'il ne pourrait pas demander à une entreprise de maçonnerie. Comme tout citoyen, il est tenu de connaître et de respecter les lois et les décrets parus au *Journal officiel*.

Quoi qu'on en dise, sa liberté de conception n'est pas bridée par les règlements corporatistes, les directives techniques ou la plupart des normes (qui n'ont aucun caractère obligatoire, mais seulement un caractère indicatif). Les entreprises du bâtiment, par le biais de leurs assurances, sont contraintes, elles, à des milliers d'obligations techniques. Notez que les 1 300 pages du cahier des charges de la RT 2012 ont été publiées au *Journal officiel*.

Masse thermique des parois verticales

Supposons, par exemple, que la paroi interne soit prévue en cairons (parpaings) de ciment : on les emplira de masse thermique. Le gravier

Copyright © 2016 Eyrolles.

apporterait une grande masse thermique, mais il ne régulerait pas l'humidité. Aussi, si la terre du terrain est un tant soit peu poreuse ou argileuse, on pourra en remplir ces cairons, après l'avoir tamisée avec un grillage. Un mur de briques plâtrières ferait encore mieux l'affaire : forte masse et capacité à emmagasiner les excès d'humidité. On pourrait aussi couler un béton de chaux entre deux panneaux : OSB du côté intérieur, DWD (Agepan) du côté extérieur. Auquel cas, le DWD serait maintenu par les madriers qui porteront l'isolant, tandis que l'OSB serait maintenu par des madriers verticaux que l'on démontera ensuite. Pour éviter de percer la paroi, il suffit de couler le béton de chaux tout autour de la maison, par tranches d'une dizaine de centimètres, humide sur humide. Vous pouvez utiliser du béton de ciment, mais il faudra en retarder la prise et soigneusement organiser les livraisons par toupie.

Isolation des parois verticales

Entre les madriers, on placera les panneaux d'isolant. Il est conseillé de disposer les madriers la tête en bas, de façon que les échardes se dirigent vers le haut : elles aideront à empêcher l'isolant de glisser avec le temps. Chaque fois que l'on aura placé un ou deux panneaux, on vissera une entretoise entre les madriers, qui :

- pressera les panneaux d'isolant dans le sens vertical ;
- évitera que les madriers ne flambent avec le temps (tassant un panneau d'un côté, libérant une zone moins isolée de l'autre) ;
- renforcera le contreventement.

Devant l'isolant (et éventuellement une lame d'air), on fixera l'isolant le plus perméable à la vapeur (ici : des panneaux de fibres de bois) en les vissant sur les tranches des madriers. Si la zone est très humide, on peut limiter le pont hydrique que forment les madriers (bien que, leurs fibres étant verticales, il soit limité : il suffit d'en peindre la tranche qui est appuyée contre le mur avec une peinture bas de gamme, étanche).

Dans la majorité des climats provençaux, la façade sud reçoit plus de chaleur (calories) en hiver qu'elle ne reçoit de froid (frigories). Il est donc avantageux de l'isoler très légèrement (le PassivHaus Institut recommande 10 cm d'isolant). Il est souvent encore plus avantageux de l'isoler par l'intérieur, ce qui crée des ponts thermiques tous orientés au sud. Il faut néanmoins noter que les logiciels thermiques officiels considèrent les ponts thermiques comme des fuites de chaleur, puisqu'ils ne calculent pas les apports de chaleur mais seulement les déperditions. Attention à ce que les seuils de déperdition minimaux réglementaires soient cependant atteints.

Fenêtres

Les fenêtres seront choisies avec un bon Uw, ce qui signifie qu'à part quelques fenêtres, en altitude, donnant au nord, le triple vitrage n'est jamais nécessaire en Provence. Les fenêtres donnant au sud, restant à l'ombre durant toutes les heures d'été, devront laisser passer un maximum de la lumière d'hiver. Les autres vitrages devront surtout protéger du froid d'hiver. La qualité de la fermeture des volets est importante dans l'arrière-pays (entretien régulier des joints). La tranche supérieure des volets de bois sera protégée en y clouant un ruban de zinc. Si un règlement municipal vous interdisait d'édifier une ombrière en haut d'une fenêtre, vous pourriez recourir aux volets fermés durant la journée mais ouverts à la fraîche (comme le faisaient les anciens). Vous pourrez peut-être enrouler une moustiquaire, de fibres claires, en haut de la fenêtre : déroulée, elle laisse passer une luminosité atténuée ; les rayons solaires aux heures chaudes de l'été arriveront d'en haut et réchaufferont la toile légère de la moustiquaire, ils ne pénétreront pas directement

Copyright © 2016 Eyrolles.

par les vitrages ; en hiver, vous laisserez la moustiquaire roulée pour que les fenêtres captent tout le rayonnement.

Ventilation

La ventilation à la mode (surtout pour les maisons passives), celle que promeuvent les entreprises commerciales ainsi que les labels venant de pays froids, est la ventilation double flux. Tout comme le triple vitrage, il est très rarement nécessaire, en Provence, de recourir à un équipement aussi sophistiqué et aussi contraignant. Une ventilation déclenchée par un capteur d'humidité suffit largement. C'est d'ailleurs le choix qu'ont fait la plupart des maisons BBC de notre région. Mais on aboutit vite à une absurdité : pourquoi investir dans des fenêtres tellement performantes (et dans une étanchéité à l'air) si c'est pour accepter des trous dans ces fenêtres ? La ventilation hygroB se déclenche lorsqu'il y a trop d'humidité dans une pièce (salle d'eau, cuisine) et aspire cet air humide, qui est remplacé par un air plus sec provenant de l'extérieur et qui, auparavant, balaye les autres pièces. Si une prise d'air commune aboutit par les faux plafonds aux pièces sèches, on obtient un effet similaire de renouvellement d'air. Cette ventilation serait suffisante pour éliminer les excès d'humidité, mais n'interdit aucunement les ventilations naturelles par des fenêtres ouvertes (pour les bâtiments à forte inertie).

Certains fabricants commercialisent ce système d'ailettes qui permet, par simple dépression (pas de ventilateur), d'aspirer de l'air frais et de le réchauffer avec la chaleur de l'air sortant. Une méthode moins efficace mais souvent suffisante consiste à faire sortir le conduit d'air vicié de la zone isolée vers un caisson. Il s'agit d'un coffrage (en panneaux de bois empli d'isolant soufflé) dans lequel les conduits PVC d'air entrant et d'air sortant se longent et sont entourés d'un embobinage de fils de cuivre. De ce caisson sortent donc deux conduits : l'un se dirige vers le moteur de la ventilation (air vicié sortant), l'autre se dirige dans une autre direction et capte de l'air frais (en général, on dirige le conduit d'air sortant vers l'ouverture ouest et celui d'air entrant vers l'ouverture est ; ils se font face au haut des combles).

Persiennes ou volets

On vous dira que les persiennes sont réservées à la côte méditerranéenne alors que les volets pleins sont d'usage à l'intérieur des terres. C'est souvent vrai (mais dans le Niçois, les volets sont pleins). Autrefois, les mestres appelaient « volet » une pièce de bois qui occluait une fenêtre par l'intérieur. Lorsqu'on mettait la pièce de bois du côté extérieur, on l'appelait « contrevent » (puisqu'elle protégeait la fenêtre du vent).

Dans les régions qui connaissent une poussière importante (la plus grande partie de la Provence), on place un filtre à l'ouverture du conduit d'air entrant. Dans ce cas de figure, les petites ouvertures d'aération sur les fenêtres ne sont plus nécessaires, mais un accès aisé aux combles l'est (changement des filtres, entretien du moteur de la ventilation).

Le fait d'avoir prévu une zone fraîche au nord, lors de la conception du bâtiment, permet de profiter de la différence avec la température de l'espace situé au sud de la maison. Puisque les sections des ouvrants au nord sont très inférieures à celles en sud, on peut déclencher une ventilation naturelle efficace quand on le veut (effet tuyère). Si on a prévu des fenêtres hautes à bascule en sud, le courant d'air passera au ras du plafond et ne gênera pas les habitants.

Avez-vous prévu une ventilation des combles ? Si oui, vérifiez qu'elle ne balaye pas les pièces de bois, ce qui préservera la durabilité de votre charpente.

Schématiquement, on considère une ventilation nord-sud forte et puissante, enclenchable ad

Copyright © 2016 Eyrolles.

voluntam (ouverture ou fermeture d'un ouvrant), et une ventilation est-ouest lente, constante et permanente tout au long des mois chauds.

Air froid nocturne

Sous nos climats provençaux, une maison bioclimatique devrait toujours intégrer un système de rafraîchissement naturel. Outre le déphasage de douze heures par les parois, on capte l'air froid nocturne, puisque, en été, il est de 16 °C plus frais que l'air du jour. Différentes techniques sont adoptables : le déversement d'air froid dans une pièce ouverte (patio ou atrium) sur laquelle peuvent s'ouvrir des fenêtres ; le remplissage de la maison fermée par un air frais capté sur de l'herbe (humide de rosée au petit matin) d'un jardin haut ; le stockage de la fraîcheur d'air nocturne sur de larges nappes de galets ; le déversement, au petit jour, de l'eau d'une fontaine à bords hauts vers une citerne située dans la cave que l'on remplace par de l'eau moins froide qui se trouvait durant le jour dans la même cave ; le captage par un ducte enterré de l'air frais accumulé dans une dépression humide en aval de la maison (convection naturelle) ; etc.

Le verre transmet les calories. Un puits de lumière permet de capter l'air froid nocturne et de rafraîchir toutes les pièces adjacentes en été. En hiver, pour remédier à cet effet, il faut prévoir un tuyau de gros diamètre (20 cm) qui passe sous la maison pour purger cet air froid. Ce tuyau, qui sera obturé à l'air mais pas à l'eau en été (clapet), restera ouvert en hiver.

7. Chauffage

Le chauffage au bois est un plaisir, même à travers un insert. Le chauffage aux pellets de bois n'apporte pas le même plaisir aux yeux, mais lui aussi confère une chaleur très agréable. Ces deux systèmes étant basés sur une combustion ont le défaut d'imposer des ouvertures, permettant à de l'air frais d'apporter son oxygène, qui constituent des ponts thermiques traversant l'enveloppe isolée. Il faut pouvoir fermer ces ouvertures correctement lorsqu'on n'utilise pas ce type de chauffage. Le gaz, lui, est disponible dans toutes les villes de France ; il passe par des tuyaux de cuivre qui forment des ponts thermiques liant le logement et le sous-sol, et évite la corvée de bois ou celle de se faire livrer les pellets.

Dans une maison bioclimatique bien conçue, les besoins en chauffage sont généralement très faibles. Quelques ampoules électriques, des habitants qui respirent, et le calcul montre que les besoins peuvent être largement inférieurs aux cibles de 40 ou de 15 kWh/m^2. Auquel cas, et bien que ce ne soit pas la mode, la souplesse de l'énergie véhiculée par l'électricité peut s'avérer commode pour satisfaire nos besoins même en cas d'hiver froid. Si une pompe à chaleur est installée dans un espace artificiellement tempéré, elle sera très suffisante.

Eau chaude

Étant donné la bonne efficacité des panneaux solaires thermiques (jusqu'à 200 °C en 2015), et l'obligation légale d'en pourvoir toute construction individuelle neuve, l'eau chaude sanitaire

Copyright © 2016 Eyrolles.

sera assurée par ce biais. Ce qui suppose que ces panneaux soient orientés pour répondre aux besoins d'hiver, d'une part, et que l'eau ou le glycol qu'ils contiennent ne se vaporise pas en été. Ils seront donc verticaux sous nos latitudes. Cela pose souvent un problème d'esthétique, d'autant que les pertes de chaleur par les tuyaux (même isolés) impliquent que les panneaux doivent se trouver à proximité d'un ballon isolé de stockage. Sous nos climats, les capteurs plats s'avèrent très suffisants ; on laissera la technologie des capteurs sous vide aux habitats situés au nord du 45e parallèle.

Photovoltaïque

Les grandes avancées techniques de l'industrie des panneaux solaires photovoltaïques commencent à rendre leur exploitation rentable, en fonction du prix de vente variable à EDF. Ce qui suppose qu'ils soient fréquemment nettoyés de toute poussière, qu'ils soient parfaitement orientés et que l'on dispose des derniers modèles. À l'inverse de l'eau chaude, l'électricité se transporte sans grandes pertes. Les panneaux photovoltaïques peuvent donc être installés sur le terrain à distance de la maison, ce qui évitera aussi aux habitants d'être abreuvés des champs magnétiques qu'ils génèrent. D'aucuns prétendent que la technicité n'est pas encore aboutie et qu'il vaut mieux attendre quelques années avant de s'équiper, mais, dans tous les cas, ils prévoient, dans leurs plans, des surfaces inclinées au bon angle à 32 °C pour les supporter. D'autres visent l'autoconsommation et ne pensent plus à revendre leur production à EDF. C'est la tendance du moment : l'amélioration technique des batteries laisse à penser que l'on pourra bientôt faire marcher sa machine à laver en se contentant de son stockage d'électricité. Les autoconsommateurs d'énergie photovoltaïque orientent leurs panneaux différemment : il ne s'agit plus de produire un maximum d'énergie pour une maison qui n'a pas de besoin de climatisation en été, mais de produire le plus d'énergie possible en hiver : leurs panneaux sont orientés à 45°.

Repère

Si un tuyau en cuivre long de 20 mètres, non isolé, relie une chaudière (au fioul) à un chauffe-eau et que (pour simplifier) il est suspendu dans un air à température moyenne de 20 °C sur l'année, le coût de l'énergie qu'il abandonnera à l'air sera de l'ordre de 500 €/an.

Captage de l'eau de pluie

L'eau de pluie ne contient ni calcaire, ni chlore, ni métaux lourds. L'*aqua prima* de nos orages est même une eau qui ne contient ni poussières, ni insecticides, ni pesticides. Il faut la stocker et s'en servir pour laver ou se laver. Pour qu'elle ne tourne pas lors des fortes chaleurs, on utilise des récipients en ciment (et surtout pas en plastique). Une cuve de fosse septique ou un bassin font l'affaire, d'autant mieux s'ils ajoutent le bercement du bruit d'une petite fontaine. Si l'eau d'une gouttière s'écoule paisiblement (pente de 5 mm par ml), une rupture de la gouttière suffit pour séparer l'*aqua prima* de la *prima aqua*.

8. Prévoir des cas extrêmes

Durant le siècle que va durer votre maison, il y aura des cas extrêmes.

Le climaticien pense, bien entendu, à des hivers froids et prolongés où le ciel resterait bas durant des mois. Il prévoit donc une masse thermique conséquente qui permette de profiter, dans le logis, d'un déphasage transsaisonnier. Certains prévoient plus d'une tonne de matériau pour chaque volume de 5 m^3 d'air (soit 0,5 t/m^2).

- Si une canicule s'avérait particulièrement longue et épouvantablement chaude, que pourrions-

Copyright © 2016 Eyrolles.

nous faire ? Y a-t-il un lieu sur le terrain qui resterait vraisemblablement plus frais que les autres ? Une cave sans doute, si elle est pourvue d'un courant d'air possible (et d'une prise d'eau pour en arroser le sol).

- Au cas où le changement climatique en cours induirait des épisodes orageux, qui se multiplieraient, l'un derrière l'autre, durant des semaines : a-t-on surdimensionné l'évacuation de l'excédent d'eau de ruissellement du terrain ? Et a-t-on envisagé une surcapacité d'eau de ruissellement qui pourrait nous arriver d'un terrain voisin ?
- Les douches consomment moins d'eau que les bains, pourtant il faudra prévoir au moins une baignoire : il se peut qu'un jour on apprécie de pouvoir y baigner un malade pour faire descendre sa fièvre.
- Un jour peut-être, dans l'histoire de cette maison, une personne devra en être évacuée sur un brancard (ou dans un cercueil), il y a donc lieu de vérifier que, quel que soit l'étage, deux hommes puissent en sortir aisément en portant un plateau de deux mètres de long (c'est l'une des raisons pour lesquelles un sas d'accès mesure trois mètres de long).

Albédo

La course du soleil aux heures chaudes des mois chauds est à peu près comprise entre 60 et 70° par rapport à l'horizontale. Le cosinus de 60° est 1/2. Donc toute surface située à une distance inférieure à 50 % de la hauteur de la maison (H/2), depuis la façade sud, réfléchira les rayons les plus chauds de l'été vers cette façade (exemple : une maison de 8 m de haut (H) entre le sol et la gouttière de sa façade sud. Toute la surface située jusqu'à 4 m (H/2) devant la maison réfléchira les rayons les plus chauds de l'été sur la façade). Donc cette bande de terrain devrait être mate et sombre ou bien, idéalement, couverte de verdure. Par contre, la surface qui se trouve au-delà de H/2 peut tout à fait être brillante ou de teinte claire, puisqu'elle ne réfléchira les rayons solaires vers la façade sud que lorsque le soleil sera bas (en hiver). En d'autres termes : si vous aimez les allées de graviers blancs et que la configuration du terrain vous amène à prévoir une allée devant la façade sud, alors faites-la passer à plus de H/2 de la maison : elle illuminera l'intérieur de son albédo en hiver, mais ne chauffera pas la façade en été. Inversement, si vous souhaitez une terrasse en bois gris ou en dallage de terre cuite ou une bande d'herbe, il n'y a pas de contre-indication bioclimatique à la placer dans la distance de H/2 devant la maison. Mais ne couvrez pas une terrasse de carreaux blancs à cet endroit.

Un autoconstructeur peut adapter son chantier en fonction des contingences. Il passera parfois trop de temps sur un détail qui, apparemment, lui ferait plaisir. C'est sa maison, son aventure, son chantier, et voilà qui est en tout point respectable. D'autant plus qu'il connaît parfaitement l'effort physique nécessaire pour effectuer chaque tâche. Il va être terrassier et maçon et plombier et électricien et peintre... Il « peut tout faire », mais il n'a pas l'expérience des ouvriers de tous les corps de métier du bâtiment. Alors il regarde attentivement et il pose des questions. Il choisit de préférence des procédés constructifs simples, ceux qui autorisent de petites erreurs. Un passant pourrait penser qu'il a passé trop de temps à peindre le cadre d'une fenêtre, mais l'autoconstructeur avait peut-être déterminé que cette fenêtre était particulièrement susceptible de souffrir du vent et de la pluie. Il fait du sur-mesure. L'important est que sa maison lui convienne, pas qu'elle ressemble à une autre. Le monde archinormé du bâtiment a tendance à lui mettre des bâtons dans les roues, on devrait peut-être, comme sous d'autres latitudes (Amériques), lui faciliter le travail et utiliser son inventivité.

L'autoconstructeur accorde une pondération importante à l'efficience de chaque

Copyright © 2016 Eyrolles.

solution choisie. Il dispose généralement de peu de machines et, à force de courbatures, il a appris l'efficacité musculaire de chaque geste. C'est un actif, un entreprenant. Il construit avec envie et, souvent, avec passion.

9. Valorisation

La valeur de revente de votre maison dépend d'abord de sa pérennité : vous vendrez mieux ce qui est solide et ce que votre acheteur pourra revendre.

- Solidité ne signifie pas que les options de construction devront être complexes.
- Moins votre maison comportera de murs de refend et plus le prochain propriétaire pourra l'adapter à ses goûts et à ses besoins : optez plutôt pour des poteaux.
- Moins votre maison consommera d'énergies fossiles structurellement, et moins y vivre sera onéreux pour votre acheteur d'un jour.
- Ces trois règles sont tempérées par une quatrième : tous les propriétaires successifs préféreront des pièces chaudes pour y vivre, des pièces plus fraîches pour se reposer et des pièces encore plus fraîches pour se déplacer ou stocker.

Incitation double

50 kWh/m²/an représentent la consommation totale d'énergie primaire d'un bâtiment à basse consommation (eau chaude + chauffage + ventilation + climatisation). C'est à peu près ce que consomme une maison standard des années 1990 pour sa seule eau chaude (ballon électrique). En d'autres termes : dans les années 1990, les gouvernements européens souhaitaient économiser, à terme, l'importation de l'énergie fossile équivalente à tout ce qui était dépensé sur leur territoire en chauffage, climatisation, ventilation, etc. Ils ont donc un énorme intérêt financier à inciter les habitants à réaliser (à leurs frais) les travaux nécessaires, que ce soit avec une carotte ou un bâton, que ce soit au nom de la sauvegarde de la planète ou de celui de leur balance commerciale.

- Les pièces donnant sur le sud seront donc les « pièces de jour » (salon, salle à manger et cuisine), les pièces juste en retrait serviront pour dormir ou se laver (« pièces de nuit ») et les pièces au nord seront surtout affectées aux déplacements (escaliers, couloirs) ou au stockage (cellier, placards…).

A priori un vide sanitaire représente une forte déperdition d'énergie, mais il assainit la maison en limitant l'humidité. Reste la question habituelle : cave ou non ? Les habitats provençaux traditionnels ne comportaient de cave (ou d'atelier) que lorsque le terrain présentait une forte déclivité. En d'autres termes, le rez-de-chaussée de la maison correspondait toujours à un accès sur rue, sur l'un de ses côtés.

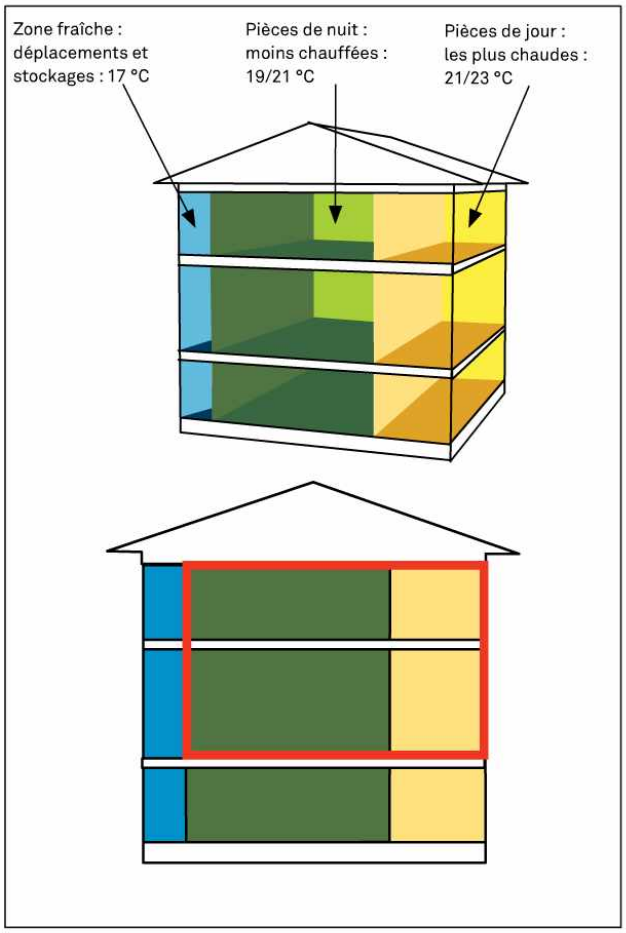
Si l'on suppose que, aujourd'hui, les terrains plats devraient être consacrés à l'agriculture et que les autoconstructeurs privilégieront des terrains pentus pour rester assurés que le soleil éclairera toujours les façades de leurs maisons (quel que soit le projet du voisin aval), alors on peut envisager une cave. Dans ce cas, au sein du volume de la maison, on retrouvera la forme cubique tellement favorisée par les calculs de déperdition des réglementations thermiques. S'il y a une source de chaleur autre que solaire, elle se situera idéalement dans les pièces de jour, devant la paroi des pièces de nuit. Donc, de facto, les déperditions des pièces de jour réchauffent les pièces de nuit, lesquelles préchauffent les pièces de passage/stockage.

Le soleil chauffant en hiver à travers les baies au sud, il est recommandé de placer les émetteurs de chauffage dans les pièces de jour, devant la cloison qui les sépare des pièces de nuit. Ainsi, on va naturellement dans le sens de la cascade des températures intérieures d'hiver : 21 °C pour les pièces de jour, 19 °C pour les pièces de nuit et 17 °C pour les pièces de passage/stockage. De même, un chauffage par le sol peut se contenter d'être placé dans les pièces de jour : le ferraillage

Copyright © 2016 Eyrolles.

des dalles assurant la conduction de la chaleur nécessaire vers les pièces de nuit.

Dans notre monde normé, la valeur de la maison d'un autoconstructeur dépendra de la sécurité que son acheteur d'un jour ressentira à la lecture de certains documents : consommations de chauffage, consommations électriques, garanties décennales. Les deux premiers chiffres, résultant directement de la conception attentive et de la réalisation soigneuse des travaux réalisés par l'autoconstructeur, vont rapidement convaincre l'acheteur. Pour ce qui concerne les garanties décennales, il n'y en a que deux qui soient régulièrement exigées : celle d'un maçon et celle d'un couvreur. L'acheteur veut bien être convaincu par les explications de l'autoconstructeur, mais pas son assureur ! C'est la raison pour laquelle nombre d'autoconstructeurs ne commencent à construire leur maison qu'une fois la carcasse édifiée. Les autres ont pris des photos tout au long de leur chantier et les présentent comme autant d'arguments convaincants. Reste que les acheteurs potentiels se limiteront alors à ceux qui sont aptes, à partir de photos (et d'une caméra thermique), à juger de la rigueur de la construction.



À travers toutes les parois, les pièces à vivre (encadrées de rouge) préchauffent les pièces tampons qui les entourent (sauf en sud).

L'âge des machines de la maison et leur degré d'usure représentent une autre part de la valorisation du fait de leurs éventuels remplacements. Le plus gros poste est habituellement le chauffage, or celui d'un bâtiment bioclimatique est ridiculement faible. La maison d'un autoconstructeur en sera d'autant plus valorisée.

Deux autres machines vont prendre de plus en plus d'importance : la ventilation et les pompes à eau.

- Une maison bioclimatique provençale bien isolée n'utilise de moteur pour sa ventilation que deux ou trois mois par an, son usure au bout de dix ans sera ridicule, ce qui valorisera la maison.
- La pompe de relevage qui permet de récolter les eaux grises des salles d'eau (pour en enlever le savon et les quelques résidus) et de les remonter dans les réservoirs des toilettes n'est aucunement une obligation, mais pourrait s'avérer indispensable lorsque l'eau de ville deviendra encore plus chère : cette pompe s'usera et devra être implantée à un endroit où elle pourra facilement être remplacée (dans la cave, par exemple).

On peut imaginer que, dans dix ou vingt ans, le climat ne sera plus tout à fait ce qu'il est aujourd'hui ou bien que la qualité des isolants aura considérablement évolué. Il faudra donc être vigilant, au moment de la conception, à ce que la plupart des isolants puissent être remplacés un jour, afin de ne pas risquer de nuire à la valorisation

Copyright © 2016 Eyrolles.

REUE

Les Provençaux consomment plus d'eau pour se laver que pour évacuer leurs toilettes. La réutilisation des eaux usées épurées (REUE), dites aussi « eaux grises » (eaux issues des salles d'eau, à l'exclusion des eaux noires des toilettes), est encore rare : il s'agit de réutiliser cette eau épurée pour les réservoirs des toilettes. Les équipements sont encore coûteux, puisqu'il est nécessaire de prévoir un circuit de distribution spécifique. Récupérer les eaux grises induit d'équiper la maison d'un réseau pour les eaux noires (eaux vannes, eaux de cuisine, etc.) dirigé vers le système d'assainissement et d'un autre destiné aux eaux grises. Les eaux grises sont collectées dans la cave, filtrées de leurs résidus (savon, peaux mortes, poils) par un filtre et une membrane, puis redirigées via une pompe pour alimenter les réservoirs des toilettes. Certains fabricants proposent des douches qui intègrent des filtres à savon et à résidus qui peuvent être envoyées aux toilettes les plus proches (sur la base d'une douche/un réservoir de toilettes). Dans un foyer, utiliser deux fois les eaux grises représente 40 % d'économie du précieux liquide.

du bien autoconstruit. Ce qui suppose un accès permanent à toutes les surfaces des façades de la maison pour un ouvrier (60 cm) et un panneau d'isolant (20 cm).

Les autres mécanismes utilisés dans la construction d'une maison (pompe à chaleur, pompe de forage, ventilation de puits canadien, panneaux solaires photovoltaïques, etc.) voient leur technicité évoluer tellement rapidement qu'il est difficile d'émettre une opinion sur la tendance de leur valeur de remplacement. A priori la technologie des panneaux solaires thermiques semble mature, surtout en cas de thermosiphon (un mécanisme passif). Notez que dans une étude portant sur 144 maisons BBC en France, le mécanisme qui s'est avéré le plus performant du point de vue « efficacité thermique/coût total » est un ventilateur lent (qui permet de faire descendre l'air chaud qui s'accumulerait au ras du plafond en hiver, et de créer un courant d'air rafraîchissant en été).

L'énergie nécessaire pour faire monter la température de l'air d'une salle de bains de 10 m^2 (24 m^3) de 20 à 25 °C en une heure : 40 Wh, c'est-à-dire l'équivalent d'une ampoule électrique.

Un ballon d'eau chaude dont la surface serait à 35 °C et qui se trouverait dans une pièce constamment à 20 °C émettrait 4 730 kWh par an (soit 540 Wh/heure), soit l'équivalent d'un émetteur de chauffage d'une puissance de 540 W.

Pour que les salles d'eau soient de 4 °C plus chaudes que les pièces à vivre, il suffit de placer à proximité immédiate le ballon d'eau chaude. Avantage accessoire : le délai entre l'ouverture du robinet et l'arrivée de l'eau chaude sera considérablement réduit (source d'économie).

1 litre de fioul = 1 m^3 de gaz = 10 kWh

En deux mois d'hiver affirmé en Provence, les déperditions par un simple vitrage bien posé (sans rideau, sans volet) représentent 51 litres de fioul / m^2 de vitrage ; par un double vitrage (sans rideau, sans volet) : 12 litres de fioul /m^2 de vitrage.

La pose minutieuse de volets pleins, fermant bien, représente une grande efficacité thermique. Il ne faut surtout pas hésiter à les isoler (si l'esthétique le permet). C'est la lame d'air prisonnière entre le volet et le vitrage qui fait office de pièce tampon.

Une maison bioclimatique provençale ne craint le froid que durant les nuits d'hiver (les jours y sont 14 °C plus chauds). À cette époque, on ferme les volets dès le crépuscule, et on allume les lumières dès 18 h.

Pare-vapeur ou frein vapeur

Si l'on place un pare-vapeur avant le séchage complet de la chape ou de la dalle de béton (deux ans de séchage), on crée immanquablement des colonies bactériennes entre le pare-vapeur et la paroi. À moins d'avoir attendu ce délai, il vaut toujours mieux placer un frein-vapeur hygrovariable qu'un pare-vapeur.

Copyright © 2016 Eyrolles.

La ventilation double flux

Elle peut faire économiser jusqu'à 25 % de chauffage. C'est plus que les 400 kWh consommé par les ventilateurs si le climat local et la conception de la maison représentent une déperdition supérieure à 1 MWh/an. Si une maison est passive et consomme 15 kWh/m².an, alors, arithmétiquement, 66,66 m² correspondent à la consommation des ventilateurs de la ventilation double flux. Les technologies qui nous viennent du nord du 46e parallèle (Moulins, Lausanne, Québec, Allemagne, Angleterre, Autriche, etc.) ne prennent en considération que les déperditions thermiques car dans ces régions le soleil d'hiver représente trop peu d'apports thermiques pour qu'ils soient considérés comme notables. En Provence, au contraire, les apports solaires d'hiver sur une paroi sud sont généralement supérieurs à ses déperditions (jusqu'à 50 % supérieurs). Notez que la ventilation double flux est une technologie d'ingénieur : allumer un feu de cheminée devient toute une affaire. On ne peut brancher une hotte de cuisine sur l'extérieur. Si un couple d'amis vient passer une semaine, cela fait deux occupants de plus : ils exhalent de l'air, ils se lavent, leurs apports d'humidité ou de chaleur sont excédentaires par rapport au réglage initial de la machinerie. Si vous savez estimer ces apports et reprogrammer la ventilation double flux : pas de problème.

Un lustre, situé à proximité des fenêtres sud, sera donc allumé cinq heures de plus le 21 décembre que le 21 juin. Si ce lustre comporte huit ampoules à incandescence de 60 W (et qu'elles perdent 75 % de leur énergie sous forme de chaleur), outre leur lumière, elles apporteront 1,8 kWh de plus dans les pièces de jour et contribueront à leur chauffage.

10. Le coût

Les constructions de l'après-guerre privilégièrent le ciment. Cet usage perdure. Le parpaing de béton est un matériau minéral particulièrement perméable aux calories, les déperditions qu'il engendre sont mal contrebalancées par les

À noter

Vitesse de l'air dans une gaine : 5 m/s si ventilateur et 1 m/s si tirage naturel. Vitesse de l'eau dans une tuyauterie : 1 m/s. Ventiler, c'est apporter au moins 30 m3/h.personne.

procédés techniques, pourtant complexes et onéreux, que nous avons mis au point : les fenêtres hautement perfectionnées, utilisées aujourd'hui, ne compensent pas les pertes dues aux parois opaques. Si le monde de la construction s'entêtait à construire sans prendre en compte le climat local, il nous condamnerait à tenter de corriger cette lacune par l'achat de technologies toujours plus fines, complexes et dispendieuses. On peut déjà considérer que l'on ne reproduira plus de maisons de 100 m² dépensant 40 000 kWh/an, elles appartiennent aux excès du passé récent. Une habitation qui consomme 200 kWh/m².an représente mieux la réalité d'un marché : celui des bâtiments construits après la révolution industrielle qui correspondent à nos souhaits actuels en termes de luminosité et de dimensionnement des pièces.

La bioclimatique permet de diminuer cette consommation. Selon le terrain, l'emplacement et le climat local déterminent les apports naturels que l'on peut capter. Ce qui empêche de déterminer la baisse des déperditions d'un bâtiment standard, puisque chaque cas est particulier. On ne peut pas non plus quantifier les apports de chaleur dus au soleil, sauf à imaginer que toutes les maisons seraient orientées plein sud sur des terrains dégagés. On ne peut donc proposer que des ordres de grandeur : la seule conception bioclimatique pourrait aisément faire diminuer le besoin énergétique d'une maison de 200 à 120 kWh/m², soit un gain de 16 000 kWh/an, pour 200 m² habitables. Quantité qu'il n'y aura plus lieu de compenser par des installations ou des machines dispendieuses lorsque, en 2020, chaque bâtiment neuf devra être à « énergie positive »

Copyright © 2016 Eyrolles.

(BEPOS). Dans l'arrière-pays provençal, certains bâtiments bioclimatiques bien conçus affichent des consommations de chauffage et climatisation inférieures à 5 kWh/m².

Les logiques constructives bioclimatiques représentent surtout des coûts d'opportunités. Si le cahier des charges demande un garage, le construire en sud ou en ouest représentera vraisemblablement un coût similaire, mais l'impact sur la consommation énergétique sera tout autre. Le choix de la barrière qui va précéder une terrasse influera sur la thermique du bâtiment, selon qu'elle sera blanche ou sombre (albédo), en bois ou en métal (conduction), pleine ou ajourée (captage d'air frais), fixée avec des chevilles métalliques ou en plastique (pont thermique). Une baisse de la consommation d'énergie, année après année, correspond simplement à un choix éclairé, pas à un surcoût.

Le cumul de détails infimes aboutit à un bâtiment plus sobre, moins énergivore. La rigueur exigée dans la mise en œuvre demande du temps, elle est indispensable mais coûteuse. Optimiser les déperditions d'un bâtiment résulte donc, d'abord, de la formation de son concepteur.

Les procédés bioclimatiques qui apportent le plus d'énergie utilisent généralement le verre. Or les fenêtres actuelles sont onéreuses. Il y a donc lieu de mettre en balance le coût des vitrages et l'économie réalisée sur les besoins de chauffage. À titre d'exemple, une maison du Gard a accumulé les vitrages en sud ; ce surinvestissement lui permet de consommer 600 kWh/an, pour 200 m^2 habitables, soit 3 kWh/m^2.an de chauffage. La durabilité des fenêtres modernes étant particulièrement longue (garantie de 10 à 35 ans) et les caractéristiques du climat local étant a priori éternelles, l'investissement en vitrage devra être mis en balance avec la faible consommation de chauffage (3 kWh/m^2.an au lieu de 200 kWh/m^2.an) et, in fine, la valeur de revente du bâtiment.

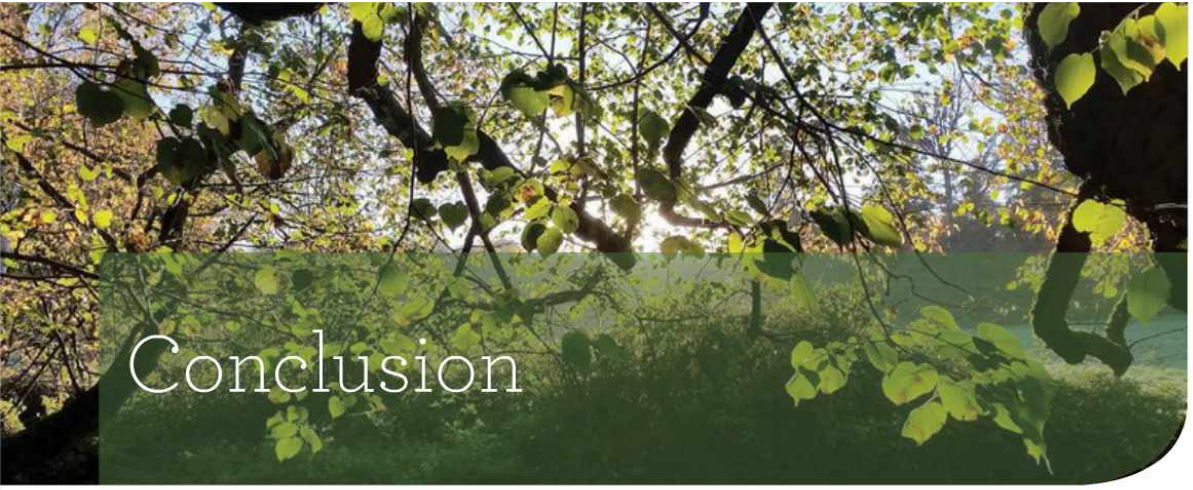
Une maison de 200 m^2 qui consomme 5 kWh/m^2 au lieu de 200 kWh/m^2 aura économisé près de 4 000 MW en un siècle. Cette énergie n'aura été consommée ni par les habitants successifs ni par la planète, son coût aurait permis de construire une autre maison identique (au moins).

La bioclimatique se sert de principes simples : le déphasage de douze heures des parois et l'isolation des combles suffisent à tempérer les logements de Provence, une masse thermique située à l'intérieur de l'isolant apporte du confort, l'usage de pièces tampons diminue les déperditions thermiques, etc. Ces principes restent les mêmes si l'on emploie les matériaux constructifs d'aujourd'hui. La faible consommation finale d'un bâtiment dépend donc d'un surcroît de talent de son architecte. Dans sa réflexion, il ajoute la thermique à l'esthétique et au bien-être des habitants. La rémunération de cet effort de conception supplémentaire représente aussi un coût, lequel constitue généralement l'investissement le plus rentable.

Conception idéale

Une maison bioclimatique, doit :
- consommer très peu d'énergie ;
- produire des aliments ;
- capter l'irradiation solaire en hiver mais s'en protéger en été ;
- consommer très peu d'eau ;
- avoir une masse thermique très importante (à l'intérieur de l'isolant) ;
- générer peu de déchets et consommables ;
- être dense (volume dédié à l'habitat d'hiver) ;
- être protectrice et solide ;
- disposer d'un air sain (sans polluants structurels) ;
- se ventiler aisément et structurellement ;
- être adaptable à une succession de propriétaires aux profils divers ;
- être facilement agrandie, modifiée ou actualisée ;
- être durable (un siècle ?) ;
- être esthétique et confortable.

Copyright © 2016 Eyrolles.



Conclusion

La démarche bioclimatique

On sait intuitivement que la nuit est plus fraîche que le jour, on a vite remarqué qu'il faisait plus chaud l'après-midi que le matin, et personne n'ignore que le zénith du soleil est plus haut en été qu'en hiver. Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, ces concepts simples ne sont pas encore suffisamment présents dans la formation des architectes. On forme les jeunes architectes aux projets, à la résistance des matériaux, à l'élégance, à la philosophie... sans prendre en compte notre environnement et son climat. Avec les nouvelles réglementations thermiques, on demande aux architectes et aux professionnels du bâtiment de s'intéresser de près au climat, et l'entrée dans le troisième millénaire s'accompagne d'un minimum de bon sens thermique dans la conception des bâtiments.

Le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie de tous les secteurs économiques de France : plus d'une tonne de CO_2 est consommée par chaque Français et par an pour construire, aménager ou chauffer son logement (soit 23 % des émissions nationales). Nous étions trois milliards en 1960 et nous serons neuf milliards avant 2050. Il va falloir accepter que les ressources en énergies fossiles ne sont pas infinies et que l'on doit les partager. Ce qui concernera aussi le monde du bâtiment. La conception d'édifices peu énergivores paraît inéluctable. C'est pour cela que le long oubli du bioclimatisme prend fin.

Le cadastre Napoléon nous a montré que, hors les agglomérations, la quasi-intégralité des maisons du Midi de la France étaient orientées vers le sud. Il n'y avait donc pas de hasard : pour nos anciens, construire des bâtiments thermiquement adaptées au climat était une priorité, à tel point que la répétition des solutions bioclimatiques avait fini par déterminer les styles architecturaux régionaux que nous connaissons aujourd'hui. Mais, depuis la dernière guerre mondiale, nous avons préféré axer nos constructions selon le tracé des routes et non plus selon la course du soleil. Nos bâtiments modernes payent cette négligence de la puissance du climat local par des consommations importantes de chauffage ou de climatisation. Maintenant qu'une certaine frugalité énergétique s'impose aux entreprises et aux particuliers, certains se sont rappelé que, avant l'ère des énergies fossiles et des isolants, on savait déjà construire des maisons thermiquement adaptées aux climats locaux. En Provence, les thermiciens de l'époque étaient de simples mestres qui possédaient des savoir-faire éprouvés : la bioclimatique.

Une fois un bâtiment construit, son enveloppe est figée, à l'inverse de nos vêtements : quand il fait froid, on se couvre plus que lorsqu'il fait chaud. Il nous faut donc concevoir des bâtiments qui soient adaptés aux froidures et aussi aux canicules. Il en a toujours été ainsi, jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, où il a fallu reconstruire vite après les destructions des bombardements. Pour sa rapide mise en œuvre, le béton a été privilégié,

Copyright © 2016 Eyrolles.

face à tous les autres matériaux de construction. Or le béton a le défaut de laisser passer les calories : il laisse entrer la chaleur quand il fait trop chaud dehors et la laisse sortir quand il fait froid. Alors, nous avons compensé les défauts du béton de ciment par des émetteurs de chauffage surpuissants qui consommaient beaucoup d'énergies fossiles. Tout allait bien jusqu'à ce que les énergies deviennent franchement onéreuses. Aujourd'hui, un Français dépense 4,8 % de son budget pour se chauffer.

Or vivre à une température agréable est devenu, plus qu'un confort, une exigence.

Nous nous sommes donc tournés vers les isolants. On a utilisé les laines minérales jusqu'à découvrir que la plus efficace, l'amiante, s'avérait cancérigène. Puis sont apparues tant de nouveautés plastiques ou écologiques que nous nous sommes trouvés submergés par l'offre, et les messages marketing voudraient que nous comparions l'incomparable. Or les isolants ne sont pratiquement équivalents que du point de vue de leur résistivité thermique. La démarche bioclimatique nous montre que nombre d'autres facteurs les différencient. Certains isolants conviennent bien à des climats à faible amplitude thermique quand d'autres correspondent mieux à la Provence. Certains régulent mieux l'humidité, d'autres peuvent supporter des charges extrêmes ; ceux qui exhalent des gaz toxiques ne sont pas recommandés pour l'isolation par l'intérieur. Quand on conçoit une paroi, le choix de l'isolant est crucial, parce que, si le confort thermique est devenu une exigence, vivre dans un air sain est une nécessité.

L'avenir

Les mestres livraient des logements dont on a estimé que les déperditions s'élevaient à 160 kWh/m^2. Ce gain de 20 % par rapport à « la maison française moyenne » n'était dû qu'à une meilleure conception de la thermique des bâtiments. Cette norme était atteinte sans consommer d'énergies fossiles, sans isolant et sans fenêtre à double vitrage. Mais il n'y avait pas de chauffage. Les habitants de cet ancien temps se pelotonnaient devant leur cheminée durant l'hiver, ils revêtaient chemise et bonnet de nuit pour dormir et considéraient comme normal de vivre à 14 °C durant l'hiver. Nous avons une autre opinion du confort, mais nous disposons maintenant de chauffages et d'isolants tellement performants que, en les combinant avec les savoirs de nos anciens, nous pouvons concevoir des maisons passives et confortables.

Si nous imaginions les bâtiments de demain en nous inspirant des principes constructifs des mestres, nos innovations technologiques se contenteraient de porter l'atmosphère de nos foyers de 14 à 19 °C (voire 21 °C). La stabilité de ces températures permettrait d'utiliser des générateurs de chaleur peu puissants, puisqu'ils n'auraient pas à être dimensionnés pour gérer les pics de froidure. Une maison de vacances ne connaîtrait jamais le gel. Nous consommerions donc beaucoup moins d'énergie.

En utilisant de nombreux vitrages, pour baigner nos intérieurs de lumière, nous augmenterons les apports naturels de chaleur. En protégeant les parois, nous conserverons les calories à l'intérieur. En isolant par l'extérieur, nous homogénéiserons les températures et gagnerons en confort. En d'autres termes, nous disposons déjà de solutions permettant d'améliorer aisément la performance thermique d'un bâtiment.

Aucune climatisation mécanique ne peut rivaliser avec le rapport efficacité/coût d'une vigne vierge, mais il faut de la patience pour attendre qu'elle recouvre une façade. Il s'agit d'améliorer l'efficacité thermique d'une maison déjà confortable en se servant des végétaux de son environnement immédiat.

Nous voyons chaque jour apparaître de nouveaux matériaux et de nouveaux modes constructifs. Deux courants innovants se dessinent : l'un

Copyright © 2016 Eyrolles.

recherche un effet esthétique (ex. : parois ondulées en feuilles d'acier découpées au laser), l'autre recycle d'anciens rebuts (ex. : la paille de lavande ou les tiges de riz). Le premier s'adresse généralement à un marché où les décideurs ne sont pas responsables des consommations futures, le second est animé par des autoconstructeurs aux poches peu garnies.

S'inspirer des savoir-faire de nos anciens et en améliorer l'efficacité par l'utilisation de produits ou de machines modernes représente une évolution de la conception de nos bâtiments. Elle permet de construire des maisons quasiment passives à un coût raisonnable. Elle autorise une grande adaptabilité aux évolutions prochaines de nos climats.

Au sens étymologique du mot – l'ensemble des savoirs qui permettent d'adapter une construction au climat –, la bioclimatique constitue la base de l'écologie. La bioclimatique emploie les énergies naturelles récurrentes parce que celles-ci sont éternelles, puissantes et gratuites ; elle préfère composer avec les conditions locales qu'investir pour s'y opposer ; elle dessine des bâtiments agréables à vivre qui durent longtemps.

Valoriser son patrimoine consiste souvent à prendre en compte son coût de construction et à parier sur sa valeur de revente. Quel sera le critère d'achat privilégié des prochains acquéreurs, dans dix ou vingt ans ? L'esthétique ou la consommation énergétique ? Le bon sens nous dit que ces deux critères convergeront nécessairement. In fine, le bien-être des habitants du lieu prime, mais chacun interprète différemment cette notion. En imaginant la solution parfaite, un ingénieur d'aujourd'hui pensera à un bâtiment austère dont le confort repose sur des machines hautement performantes alors qu'un architecte pourra concevoir un logement naturellement beau, sain et frugal.

À l'avenir, il est vraisemblable que les futurs acquéreurs demanderont des logements confortables et économes en énergies fossiles. Il se pourrait que leur point de vue s'impose. L'architecte devrait concevoir des bâtiments esthétiques, fonctionnels, contenant des habitations correspondant aux critères du marché ; il comprendra alors qu'ils devront aussi être agréables à vivre, puisque ce sera la demande du marché. On disait à l'ingénieur que « l'énergie la moins chère est celle qui n'est pas consommée » parce qu'on assimilait « énergie » à « énergies fossiles » ; il comprendra que « l'énergie la moins chère est celle qui est gratuite » dès qu'il associera « énergie » à « toute énergie utilisable », y compris celles que nous impose le climat.

Si vous envisagez une construction neuve, la bioclimatique est pour vous. Ses principes permettent une amélioration extraordinaire de l'efficacité thermique des bâtiments lorsqu'on les suit dès la conception du bâti. Mais vous pouvez aussi les appliquer pour améliorer le confort d'une maison existante, que ce soit en y adjoignant de nouveaux volumes ou en concevant son jardin. Et si vous avez acquis un bâtiment ancien, vous apprécierez d'éviter de détruire les mécanismes bioclimatiques qui avaient été pris en compte dans sa conception.

Utiliser les principes de la bioclimatique dans nos logements modernes correspond à un changement de paradigme. Le critère principal de la construction d'un bâtiment était la protection qu'il apportait. Lorsque, au XV^{e} siècle, le critère esthétique s'imposa, ce fut la Renaissance et on édifia de belles demeures. De même, le critère « thermiquement efficace » pourrait supplanter le critère encore dominant du « construire vite et apparemment bien ». Le recours à un thermicien dès la phase de la conception est déjà devenu obligatoire. Le renouveau dans la conception thermique de nos bâtiments consiste à les concevoir pour qu'ils soient plus sains, plus confortables et plus économes.

Sans nul doute, l'avenir s'imprégnera de plus en plus de développement durable.

Copyright © 2016 Eyrolles.

ANNEXES

Copyright © 2016 Eyrolles.

ANNEXE 1 : LES PAROIS

« L'enveloppe ne doit plus être considérée comme une barrière entre un climat extérieur incontrôlable (et souvent inconfortable) et un climat intérieur que l'on veut confortable et contrôlable, mais comme un filtre qui permet de dériver le second du premier. » Frédéric Nicolas, architecte à Apt (84)

Par définition, un bâtiment passif affiche une déperdition énergétique minimale. Cette frugalité et la qualité du confort de vie de ses habitants résultent essentiellement du comportement physique des matériaux qui constituent son enveloppe. Schématiquement, les parois assurent la solidité structurelle, la protection thermique d'hiver, le confort thermique d'été, l'évacuation des excédents d'humidité, et des fonctions esthétiques. Les parois des maisons passives seront donc composées de différentes couches successives. On y trouvera essentiellement un mur de structure, un complexe isolant, un film d'étanchéité à l'air, un enduit extérieur ou un bardage bois, une peinture intérieure et souvent un frein-vapeur.

1. La structure

La prise en compte du risque sismique en Provence a conduit à une réglementation stricte. De facto, elle n'autorise pratiquement que les parois à base de béton ferraillé.

Maison passive

On pourrait tout à fait concevoir une maison passive dont les parois verticales seraient constituées de 1,50 m de terre, banchée et pilonnée, habillée de parements en pierre. Les deux parois horizontales seraient tout de même multicouches : le plancher haut sous les combles et le sol sur radier.

Le béton armé

Le béton armé affiche généralement :

- une conductivité cent fois supérieure à celle d'un isolant de base ;
- une effusivité (sa capacité à jouer le rôle d'une éponge thermique) vingt à quarante fois supérieure à celle d'un isolant ;
- une diffusivité (rapidité du transfert de la chaleur en son sein) quinze fois plus forte que celle d'un isolant à base de bois, mais à peine plus élevée qu'un polystyrène ;
- une très grande inertie thermique, comparable à celles du marbre ou de la pierre ;
- une atténuation de l'onde thermique relativement faible ;
- une capillarité particulièrement importante ;
- une étanchéité à l'eau déplorable pour les parpaings, mais relativement bonne pour le béton banché, bien que tous deux soient perméables à la vapeur d'eau.

Si on isole une paroi en béton par l'intérieur, on perd les qualités thermiques du béton (inertie, effusivité) et on met ses défauts en valeur (vulnérabilité à l'eau, diffusivité et conductivité). Donc, dès lors que la solidité de la construction sera confiée au béton armé, il faudra protéger la paroi extérieure de l'eau et confier à d'autres matériaux l'isolation par l'extérieur.

Les constructions à ossature bois

Les constructions à ossature bois sont admises par la réglementation sismique. Elles présentent de nombreux avantages, mais ne sont pas idéalement adaptables à tous les climats :

- intègrent aisément les complexes isolants ;
- gèrent bien l'humidité ;

Copyright © 2016 Eyrolles.

- permettent une préfabrication en atelier et donc une grande précision de mise en œuvre ;
- génèrent très peu de déchets (construction sèche) ;
- permettent une élévation très rapide sur chantier (« hors d'eau ») ;
- endurent facilement les deux ans d'évaporation des bétons qu'elles contiennent ;
- supportent mal les chutes brutales d'humidité de l'air (vents desséchants, Mistral) ;
- deviennent onéreuses dès lors qu'elles incluent une masse thermique conséquente.

Les constructions à ossature bois sont parfaitement adaptées aux climats humides connaissant des hivers froids. Elles posent problème dans les régions à étés chauds (absence de masse thermique : elles ont tendance à conserver la chaleur à l'intérieur durant l'été). Elles vieillissent relativement vite dans les zones qui connaissent de brusques périodes très sèches (le bois « joue »). On dit en Provence que « le mistral fait vieillir la peau et les planches. »

2. Les isolants

Par définition, ne sont considérés comme « isolants » que les matériaux caractérisés par une conductivité thermique (λ) inférieure à 0,05 W/m.K. Si l'on ne retenait que les tables de conductivité thermique, on pourrait considérer que tous les isolants se valent.

Pour juger tangiblement de cette conductivité, il y a lieu de considérer l'isolant mis en place, y compris la conductivité apportée par son mode de fixation. La durabilité de la conductivité thermique des isolants dépend de la protection de l'isolant au sein de la paroi.

11 septembre 2001

Les Twin Towers se dressaient droit dans le ciel, emblèmes de la puissante industrie financière américaine. 200 000 touristes émerveillés les visitaient chaque mois. Le 11 septembre 2001 s'abattit l'apocalypse : des terroristes firent s'écrouler les deux gratte-ciel. Les ruines prirent feu. Les sauveteurs baignèrent durant des mois dans un nuage de poussières chaudes, riches en composés de zinc, de mercure ou de nickel. Ils inhalèrent cet air vicié. En donnant leurs forces vives, ils nous ont offert le plus beau test médical possible de l'impact des constituants de nos bâtiments sur nos organismes d'humains. Les poumons des sinistrés furent tapissés de poussière. Le brasier en avait multiplié l'effet toxique. Les tonnes de papier blanchi au chlore avaient dégagé de la dioxine. Les 101 étages avaient été couverts de cadres de fenêtre en PVC : ils brûlèrent en relâchant tous les composés benzoïques imaginables. Dans chaque bronche, les poisons commencèrent à se diffuser vers le sang. Sur le moment, les sauveteurs furent tous intoxiqués. Ce fut épuisant, mais, avec le temps, leurs corps finirent par éliminer l'essentiel des agresseurs chimiques. Certains métaux lourds persistèrent longtemps. Tous les sauveteurs ont vu leur système respiratoire gravement affecté. Dans leurs poumons, les macrophages n'arrivant pas à éliminer complètement les fibres minérales des isolants, les emphysèmes se sont multipliés. On peut aisément imaginer que l'asthme soit très répandu dans cette population, mais des pathologies encore plus préoccupantes sont apparues. Les médecins ont été unanimement surpris de découvrir tant de kystes dans leurs reins, dus à la laine de roche.

Les sept critères de différenciation des isolants

1) le coefficient de conductivité thermique (l'efficacité) ;

2) le coût (les possibilités de l'habitant) ;

3) la qualité de l'air respiré dans les habitations (la santé) ;

Copyright © 2016 Eyrolles.

4) l'émission de CO_2 liée à la production des isolants et à leur transport jusqu'au chantier (le changement climatique) ;

5) la capacité de déphasage (le confort thermique)

6) le comportement de l'humidité au sein des parois (la salubrité) ;

7) l'énergie grise due à la fabrication des isolants (le coût énergétique des matériaux).

Les messages commerciaux tendant à brouiller notre discernement, il faudra prendre en compte ces sept critères pour prétendre avoir effectué un choix éclairé.

L'efficacité

À quelques exceptions près, tous les isolants affichent un λ très proche de 0,04. Cela étant, tout le monde s'accorde pour reconnaître que le polyuréthane est un peu plus efficace (et que l'aérogel obtient un λ record, mais est très difficile à mettre en place).

Le coût

Le caractère cancérigène de l'amiante a été reconnu par les pouvoirs publics français en 1990 (vingt ans après les États-Unis !). Depuis, la laine de verre représente 53 % du marché français, suivi par la laine de roche (15 %). Les laines minérales représentent donc presque les deux tiers du marché. Ce qui, apparemment, répond à la question du meilleur rapport qualité/prix.

En réalité, des matériaux qui avaient été considérés comme des rebuts (paille, chutes de carton ou... déchets de branches de lavande) affichent un meilleur rapport efficacité thermique/prix.

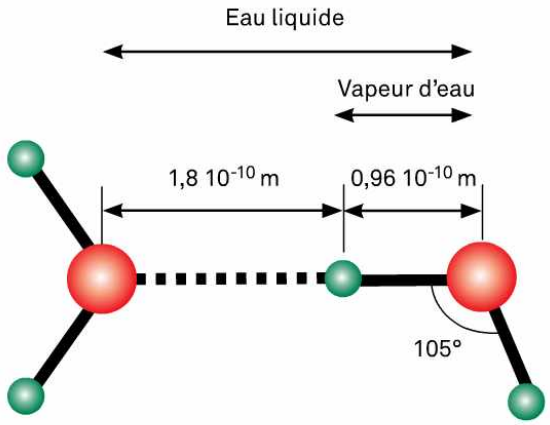
La santé

La composition chimique des fibres minérales est neutre : elles n'ont aucun caractère cancérigène ni allergène. Le désastre du World Trade Center et le suivi médical des milliers de sauveteurs qui en avaient inhalé les laines minérales, ont démontré qu'il s'agissait d'agresseurs physiques et non pas chimiques. On s'est aperçu que la laine de roche contenait des particules extrêmement fines d'un diamètre inférieur à 2,5 microns (PM 2,5) et que celles-ci, respirées, pouvaient migrer du poumon dans le sang, voire du sang dans la plèvre. Le corps humain ne sait pas non plus en rejeter les fibres longues : lorsqu'elles se plantent dans les poumons (comme des échardes), elles provoquent parfois des toux infernales.

La plupart des autres isolants présentent des contraintes chimiques : les phénoliques dégagent des formaldéhydes ; les isolants d'origine animale

À noter

Les cartons, que jettent les commerçants, sont composés de fibres de bois enserrant de fins canaux d'air. Ce sont d'excellents isolants, surtout ceux à micro-ondulations. Il suffit de les ramasser : ils sont gratuits. Mais les souris adorant y nicher, il faut éviter toute épaisseur supérieure à 2,5 cm.



Au niveau moléculaire, l'eau n'a pas la même dimension selon qu'elle est dans sa phase liquide ou sa phase gazeuse, du fait des liaisons hydrogène.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Les agresseurs du corps humain

Les émissions des agresseurs du corps humain contenus dans les isolants sont réduites au minimum par les industriels. Elles ne sont nocives pour la santé que lorsqu'elles s'accumulent dans des espaces clos (nos logements ou nos bureaux). La grande majorité des isolants émettent des agresseurs physiques ou chimiques pendant des dizaines d'années. Émis à l'air libre, leur dilution les rend généralement anecdotiques : ils n'affectent pas beaucoup plus notre métabolisme que le parfum des fleurs ou le vent balayant des fientes d'oiseaux.

sont protégés par des produits antimites connus pour leur nocivité ; le sel de bore utilisé pour protéger les isolants végétaux est nocif s'il est ingéré (mortel à partir de 1 200 mg/jour).

D'où une difficulté concernant la conception des parois : il s'agit d'isoler les bâtiments tout en y préservant une atmosphère saine. La solution réside dans deux autres contraintes : la barrière à l'air et celle à l'humidité.

L'efficacité d'un frein-vapeur ou de la barrière à l'air repose sur des microperforations très précises (à peine supérieures à 0,1 nanomètre). Elles laissent passer la vapeur d'eau mais pas l'eau liquide, puisque, du fait des liaisons polaires, le diamètre de l'eau liquide est très supérieur à celui d'une molécule d'eau isolée.

Les agresseurs physiques ou chimiques émis par les isolants affichent tous des diamètres très supérieurs à celui de la molécule d'eau (sous sa forme liquide). Un frein-vapeur efficace ou une membrane étanche à l'air les bloquent comme un tamis. Ce qui suppose que celui-ci soit absolument continu et se trouve entre l'isolant et l'habitant de la maison. En pratique, la continuité absolue de la protection implique que son intégrité soit protégée par la structure du bâtiment d'un côté, par l'isolant de l'autre… et donc que l'isolation se trouve à l'extérieur du bâti.

À noter

Contrairement à une idée reçue, un joint ne doit pas nécessairement être hermétique à tout. Sous forme liquide, l'eau a un diamètre très supérieur à celui d'une molécule d'azote (de l'air) ou à celui de H_2O (sous forme de vapeur d'eau). Des joints récents filtrent ces molécules. Ils laissent passer la vapeur d'eau mais pas l'eau liquide, même sous la pression des vents (cf. norme européenne EN 12-086).

Un frein-vapeur ou une membrane isolante à l'air ont aussi la propriété d'empêcher les molécules longues des agresseurs chimiques intérieurs, émis par le mobilier ou les parfums d'ambiance, d'être évacuées vers l'extérieur à travers une paroi, puisque le tamis d'une membrane étanche à l'air bloque toutes les molécules d'un diamètre supérieur à celui de l'azote (N2).

Les émissions de CO_2

La quantité de CO_2 émise par la production et le transport d'un isolant peut aussi constituer un critère de choix. C'est un critère plus médiatisé que pertinent. S'il s'agit de considérer l'impact écologique d'un isolant, il vaut mieux considérer son énergie grise que ses émissions de CO_2. C'est d'ailleurs ce que prévoient les certifications en qualité environnementale. On peut agir aisément sur les émissions de CO_2 : le transport est un critère sur lequel on a prise. Plus la provenance de l'isolant est proche, plus l'empreinte écologique du chantier sera légère.

L'origine des matières premières reste parfois opaque, mais le trajet depuis le distributeur final, parce qu'il concerne souvent de petits volumes, correspond généralement au coût le plus important, et celui-ci ne dépend que du choix du maître d'ouvrage.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Le confort thermique

La sensation de confort thermique, sous nos latitudes, dépend essentiellement du déphasage. Chaque matériau a une diffusivité thermique qui lui est propre. Elle représente la rapidité avec laquelle la chaleur traverse ce matériau. L'idéal étant que la chaleur perçue par la façade extérieure d'une paroi atteigne sa face intérieure environ douze heures plus tard, de façon à chauffer le logement la nuit avec la chaleur du jour et, à l'inverse, à rafraîchir l'intérieur le jour avec la fraîcheur de la nuit. L'utilisation des parois comme chauffage réversible s'oppose aux pertes thermiques dues aux ouvrants et à la ventilation de l'habitation. Ce mécanisme physique n'utilise que l'amplitude des températures extérieures, de façon passive, il ne consomme aucune énergie fossile.

L'efficacité de ce rafraîchissement du foyer le jour (et son réchauffement la nuit) sera d'autant plus grande que la région connaîtra de fortes amplitudes thermiques quotidiennes. Le déphasage est donc fondamental dans l'arrière-pays provençal, beaucoup moins en Normandie par exemple.

Puisque, par définition, R (résistance thermique) = e/λ (où e = épaisseur de l'isolant, et λ = conductivité thermique), on obtient e = λ.R. Si une paroi n'était constituée que d'isolant, pour atteindre une résistance thermique conforme à la RT 2012, il faudrait que le R des parois soit proche de 5. Puisque λ est proche de 0,04, il faudrait environ 20 cm d'isolant (de même, si on souhaite un R = 7, il faudrait 28 cm d'isolant).

La question est donc très simple : quelle famille d'isolants permet de déphaser la chaleur d'une douzaine d'heures tout en mesurant environ 20 cm ? Il n'y a qu'une seule réponse à cette question : tous les isolants à base de bois ou de fibres animales. La liste est longue : liège, lin, chanvre, fibre de bois, laine de bois, ouate de cellulose, coton, plumes de canard, laine de mouton, etc. En effet, un déphasage d'une douzaine d'heures avec les isolants phénoliques ou les laines minérales exige des épaisseurs très supérieures. Il faudrait, par exemple, 35 cm de polyuréthane (soit un R supérieur à 9) ou 40 cm de polystyrène (soit un R de l'isolant de 10).

Si, convaincu par un message publicitaire adroit, on donnait la priorité au R, alors on investirait plus dans des machines (chauffage, climatisation) et on consommerait des énergies fossiles pour compenser une énergie gratuite du climat que l'on n'aura pas utilisée : l'alternance jour/nuit. Nos anciens avaient privilégié le déphasage.

Ils n'avaient pas le choix : le seul matériau isolant dont ils disposaient était le roseau. Lorsqu'il est sec, tous ses canaux qui pompaient l'eau dans la plante se remplissent d'air. Leur diamètre est minuscule, idéal pour y emprisonner l'air. Il protège des transferts de chaleur. Un lit de roseaux exerce donc, théoriquement, un bon pouvoir isolant. Or il n'est pleinement efficace que lorsqu'il est dense. Autrement dit : écrasés sous le poids d'un bâtiment ou d'un plancher maçonné, les roseaux ont toutes les caractéristiques d'excellents isolants. Plaqués, debout contre une paroi verticale, ils laissent passer trop d'air entre leurs tiges : l'efficience thermique s'avère faible. Dans tous les cas, ils ont une propriété remarquable : ce sont d'excellents régulateurs de l'humidité. Le déphasage mesure la durée qu'il faut à l'onde thermique pour traverser une paroi.

Donc le déphasage est le retard (exprimé en heures) avec lequel la face interne de la paroi va rayonner l'énergie reçue par la face externe de cette paroi. Si la paroi est composée de plusieurs couches de matériaux différents (typiquement : paroi porteuse + isolants), alors le déphasage de celle-ci est égal à la somme des déphasages générés par chaque couche.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Les scientifiques disent que le déphasage est égal à l'épaisseur de la paroi divisée par la célérité.

Formule de déphasage (en heures) = 1,38 × e x $\sqrt{\alpha}$

e = épaisseur de la paroi (en m) ;

α = coefficient de diffusion (en m^2/h ; caractéristique du matériau de la paroi) ;

et $\alpha = \rho c/\lambda$.

ρc = capacité thermique du matériau constituant la paroi (en m^2/s), où ρ = densité du matériau et c = chaleur spécifique du matériau ;

λ = coefficient de conductivité thermique du matériau.

On remarquera que $\alpha = \rho\chi/\lambda$ est l'inverse de la Diffusivité thermique ($\Delta = \lambda/\rho\chi$).

Le déphasage est donc directement proportionnel à l'épaisseur du matériau. Autrement dit, si on double l'épaisseur d'un matériau, alors le déphasage qu'il assure double aussi. La réalité n'est pas si simple, ainsi que l'ont montré les mesures du Centre scientifique des techniques du bâtiment lors d'une grande étude de bâtiments construits avant l'Empire (1800) : ρc n'est pas réellement constant, il varie en fonction de l'humidité contenue dans la paroi.

La salubrité

Le sixième critère concerne les transferts d'humidité au sein des parois. C'est certainement le critère qui prendra le plus d'importance dans le futur, tant il conditionne le confort de l'habitat et sa salubrité.

Il n'y a aucun intérêt à ce que l'eau liquide traverse aisément une paroi. Cela abîme la structure et compromet la durabilité du bâti. Du point de vue écologique comme du point de vue financier, des parois fragilisées en continu signifient que l'amortissement de la construction devrait se faire sur une durée beaucoup plus courte. Nombre de pavillons des années 1970 pâtissent de n'avoir confié l'étanchéité de leurs parois qu'à la qualité des enduits, et leurs propriétaires constatent impuissants la dévalorisation de leur patrimoine.

L'air qui traverse une paroi a un défaut : il transporte les calories. C'est pourquoi toutes les normes actuelles, à commencer par celles du PassivHaus Institut, imposent des limites à la perméabilité à l'air des parois. Celle-ci est relativement facile à mesurer avec exactitude. Depuis 2012, elle est limitée à 0,6 m^3 par mètre carré de paroi et par heure pour les maisons individuelles, une valeur qui en 2020 pourrait se voir augmenter à 0,6 fois le volume de l'habitat par heure, sous une pression de 50 Pa. C'est pourquoi les bâtiments neufs sont couverts d'une membrane continue étanche à l'air.

Les parois des maisons françaises neuves des années 2000 laissaient généralement passer plus de 5 m^3/m^2 de paroi par heure, soit une consommation supplémentaire moyenne de 250 à 750 l d'équivalent mazout par an.

Étant donné les forts volumes de vapeur que nous émettons dans nos intérieurs, il est intéressant que la vapeur d'eau puisse traverser les parois, mais seulement dans un sens : de l'intérieur vers l'extérieur. Lorsque le brouillard sévit à l'extérieur, l'humidité sur les murs du foyer n'est jamais la bienvenue. Ce qui pose à nouveau la question du

À noter

Les parois en briques Monomur ou en ciment alvéolaire qui ont été couvertes d'un crépi ciment ou plastifié se comportent comme si un pare-vapeur étanche couvrait leur façade extérieure. Cinq à dix ans après leur construction, on voit apparaître, sous le crépi cloqué, des structures pourries d'humidité où les bactéries ont établi d'immenses colonies. Un enduit perspirant (à la chaux) aurait totalement évité ce problème.

Copyright © 2016 Eyrolles.

choix de la famille d'isolants : ceux non hygroscopiques (laines minérales) voient leur efficacité thermique plonger lorsque l'humidité les traverse en venant du côté chaud de la paroi.

Quand l'isolant se trouve à l'intérieur du bâti, on assiste souvent à un problème grave : la condensation de la vapeur d'eau en eau liquide au sein des parois. Pourquoi ?

L'humidité issue du foyer pénètre à l'intérieur de la paroi à 19 °C ; de l'autre côté, celle-ci reçoit les températures négatives des nuits d'hiver. Pour peu que l'humidité relative de l'air extérieur soit assez élevée, le point de rosée (c'est-à-dire le moment précis où la vapeur d'eau se condense en eau liquide) se trouvera à l'intérieur de la paroi.

Lorsque la structure est en béton (très perméable aux calories), la température de la face intérieure du béton est à peine plus chaude que l'air extérieur, en hiver. On constate que le point de rosée se trouve presque toujours à la frontière entre l'isolant et le béton.

La solution pour éviter ce désordre consiste à assurer une continuité parfaite entre l'isolant et le béton (surtout pas de lame d'air interstitielle), à diminuer l'apport d'humidité en plaçant un frein-vapeur du côté intérieur et à redimensionner la ventilation des pièces humides. La vapeur d'eau est un gaz : elle se déplace en fonction des différences de pression.

Elle traverse successivement les différents composants de la paroi ; sa vitesse de déplacement dépend de la perméabilité de chacun de ces composants à la vapeur d'eau. Il faut concevoir une paroi telle que de l'intérieur vers l'extérieur, chacun des composants de la paroi soit de plus en plus perméable à la vapeur d'eau ET que le composant le plus externe de la paroi soit au moins cinq fois plus perméable à la vapeur d'eau que celui le plus interne de la paroi. Ce qui suppose souvent de commencer par un frein-vapeur côté intérieur. Celui-ci se place toujours contre le côté chaud de l'isolant.

Condensation dans une paroi

Soit un volume d'air à 80 % d'humidité (HR) contenant l'équivalent de quelques gouttes d'eau : lorsque cet air (gaz) va être refroidi, il renfermera toujours la même quantité d'eau, mais ce même poids d'air sera alors être contenu dans un volume plus petit. Donc l'humidité relative (HR) de ce volume d'air (la quantité d'eau par m^3 d'air) va augmenter. Dès que l'humidité relative dépassera 100 %, il y aura condensation. Si l'isolant est apte à absorber de l'eau (hygroscopique), il va capter l'eau condensée en son sein (et la relâchera lorsque la paroi sera sèche). La laine de mouton est l'isolant qui peut absorber le plus d'eau (jusqu'à 33 % de son poids). Les isolants minéraux n'en absorbent pas (hydrofuges).

Évitez les isolants qui supportent mal la vapeur d'eau. La conductivité des laines minérales augmente lorsqu'elles sont humidifiées et elles perdent de leur efficacité thermique à mesure que les vacuoles d'air qu'elles contiennent réagissent avec H_2O. A contrario, les isolants phénoliques, eux, forment des barrières presque parfaitement étanches à la vapeur d'eau comme à l'eau.

Le frein-vapeur hygrovariable qui est trente à cinquante fois plus fermé en hiver qu'en été. En hiver, il diminue les transferts de vapeur d'eau et la vapeur d'eau transportant des calories diminue les pertes thermiques tout en limitant l'apport d'humidité (surpression d'humidité à l'intérieur du logement). En été, il est plus ouvert à la diffusion de vapeur d'eau, protégeant ainsi les isolants et le bâti.

L'investissement en isolation thermique d'une maison peut dépendre de la durabilité de ses parois. Prenons comme exemple la paroi type des

Copyright © 2016 Eyrolles.

années 1970 : isolée par l'intérieur, composée de 20 cm de béton et de 10 cm de laine minérale. Les nuits d'hiver, quel que soit le climat, la masse du béton sera froide. Dans la paroi, l'air et la vapeur d'eau, qui auront traversé l'isolant en venant de l'intérieur de la maison, seront donc plus chauds. Si la différence est importante, dès qu'il y aura beaucoup de vapeur d'eau dégagée par les habitants, selon le climat local, on atteindra plus ou moins souvent le point de rosée à l'intérieur de la paroi. Ce sera généralement sur la paroi de béton que se condensera la vapeur d'eau en eau liquide. C'est ennuyeux parce que, cette surface se trouvant dans l'épaisseur du mur, on ne prend conscience du désordre que lorsqu'il devient majeur.

Dans le cas de la paroi décrite plus haut, l'apposition sur la face interne de la paroi d'un frein-vapeur hygrovariable est indispensable, faute de quoi l'isolant minéral sera mouillé à l'interface isolant/béton tellement souvent qu'il perdra toute efficacité et se mouillera encore plus, etc.

Même en prenant en compte un frein-vapeur hygrovariable performant, simuler le comportement de la vapeur d'eau dans la paroi avec la base des données météo de Rennes, de Strasbourg, de Nice ou de Perpignan donnera des résultats tout à fait différents.

À Rennes (climat humide), en trois ans, il se condensera plus de dix litres d'eau par mètre carré de paroi ! À Nice (climat doux, peu venteux), le frein-vapeur hygrovariable remplira parfaitement son office et l'isolant ne sera pas abîmé. Il le sera encore moins à Perpignan (climat doux mais venteux), où un frein-vapeur de moindre qualité serait suffisant pour que la paroi ne se dégrade pas.

Le septième et dernier critère de choix d'un isolant concerne son énergie grise, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à son processus d'extraction-transformation-distribution-recyclage. Le bon sens ajoute à cette énergie grise celle qui a été utilisée pour sa présentation (découpe, emballage, etc.), sa protection (palettes, câbles, etc.) et sa mise en place (souffleuse, cloutage, chevilles, visserie, colle, etc.).

L'impact du conditionnement n'est pas du tout négligeable : les fibres de bois ou de cellulose

Conception d'une paroi en fonction de sa résistance à la vapeur d'eau

Enduit à la chaux : $\mu = 0{,}08$; panneau de fibres de bois : $\mu = 0{,}5$; laines minérales : $\mu = 1$; laine de bois : $\mu = 5$; plaque de plâtre moulé (BA13) : $\mu = 7$ à 8 ; béton de chanvre et chaux : $\mu = 8$; Fermacell : $\mu = 11$; parpaing : $\mu = 20$; bois : $\mu = 20$ à 50 ; panneau d'OSB : $\mu = 30$ à 50 ; béton banché : $\mu = 80$ à 130 ; polystyrène expansé : $\mu = 60$; polystyrène extrudé : $\mu = 150$; frein-vapeur : $\mu =$ entre 10 000 et 20 000.

Pour que la vapeur d'eau sorte vers l'extérieur, mais n'entre pas à travers la paroi, il faut veiller à ce que le Sd des matériaux successifs composant la paroi soit de plus en plus petit de l'intérieur vers l'extérieur de la paroi, et à ce que le « Sd ext. » soit cinq fois plus petit (au moins) que le « Sd int ». Par exemple, une paroi composée de l'intérieur vers l'extérieur de : 2,5 cm de Fermacell (Sd = 0,275, frein-vapeur) + 20 cm de béton de chaux (Sd = 1,6) + 20 cm de laine de bois (Sd = 1) + 5 cm de panneau de fibre de bois (Sd = 0,025) + 3 cm d'enduit à la chaux (Sd = 0,0024), serait perspirante. La forte inertie hydrique (vapeur d'eau) du béton de chaux et chanvre permettra aussi d'absorber les pics d'humidité émis par une salle d'eau (par exemple, suite à une longue douche chaude).
La résistance thermique de cette paroi est de 5,95 $m^2.K/W$, soit U = 0,168 $W/m^2.K$.
Théoriquement, hors ponts thermiques, les déperditions de cette paroi seront de 0,168 W/m^2 et par degré de différence entre l'intérieur et l'extérieur de la paroi. En réalité, la gestion de l'humidité par la chaux rendra cette isolation plus importante en hiver, et évaporera de la vapeur d'eau à sa surface en été (ce qui la rafraîchira). Reste à calculer l'amortissement et la résistance des parois des pièces tampons pour définir leurs températures tout au long de l'année.

Copyright © 2016 Eyrolles.

représentent 15 à 50 kWh/m^3 en vrac alors que, conditionnées en panneaux, elles se situent entre 500 et 800 kWh/m^3 selon la densité choisie. Les phénoliques à bulles ouvertes (polystyrène expansé) affichent 450 kWh/m^3, alors que, si les bulles d'air sont fermées (polystyrène extrudé), leur énergie grise atteint 850 kWh/m^3. Quant aux laines minérales, selon leur conditionnement, leur énergie grise varie entre 150 à 1 400 kWh/m^3 pour les plus courantes.

Les fournisseurs annonçant souvent des énergies grises différentes, voici quelques valeurs repères : le verre cellulaire affiche 1 600 kWh/m^3 ; le polyuréthane : 1 100 kWh/m^3 ; les isolants phénoliques se situent entre 400 et 850 kWh/m^3 ; le liège varie entre 80 et 90 kWh/m^3 ; les fibres animales (plumes, laine) approchent 55 kWh/m^3 ; le lin et le chanvre tournent autour de 35 kWh/m^3.

De tous les isolants actuels, la plus forte énergie grise atteinte l'est par des laines de roche à très haute densité : 10 000 kWh/m^3 (soit 1 000 litres d'équivalent mazout d'énergie grise pour chaque mètre cube d'isolant produit).

Ce septième critère relève de la prise de conscience des faibles réserves d'énergies fossiles qui restent sur la planète et de l'intention de contribuer le moins possible à leur diminution. Les isolants à base de fibres de bois ou de fibres animales ont un impact plus faible que les isolants phénoliques ou les laines minérales.

Les fibres végétales : le bois est traversé d'une infinité de canaux qui assuraient le transfert de la sève. Une fois secs, ceux-ci se trouvent pleins d'air. L'aubier en est particulièrement riche. On en fait d'excellentes laines de bois. L'aubier constitue le principal déchet de la production de bois de charpente.

Le polystyrène extrudé est un plastique étanche qui emprisonne des bulles d'air fermées. Le polystyrène est considéré comme un liquide incompressible tandis que l'air est considéré comme un gaz. En jouant sur ces deux paramètres, les chimistes arrivent à obtenir des portances extraordinaires (70 tonnes m^2) aptes à recevoir le choc et le poids/m^2 des roues des plus gros avions du monde. On utilise le polystyrène extrudé pour isoler les fondations des bâtiments ou les pistes d'aéroport.

Les isolants phénoliques sont ceux qui s'enflamment le plus facilement. Ils brûlent en dégageant des gaz particulièrement nocifs.

Les laines minérales : le verre conduit très bien la chaleur, les roches isolent à peine. Le caractère isolant des laines minérales provient de leur structure physique : une infinité d'échardes minérales entrecroisées emprisonnent des milliers de milliards de vacuoles d'air/m^3. Or l'air immobile isole. Si de l'eau traverse un volume de laine minérale, il va en dissoudre l'air et l'emporter : le caractère isolant disparaît et ne sera pas reconstitué même quand la laine minérale aura séché.

Le mode de fixation des laines minérales à base de rails en aluminium est très répandu, mais combine un isolant à la conduction thermique et l'un des métaux les plus conducteurs.

À noter

L'air est un gaz, la vapeur d'eau aussi. L'air se déplace du froid vers le chaud. Donc, en hiver, l'air froid de l'extérieur tend à entrer vers l'intérieur à travers les parois. La vapeur d'eau se déplace du froid vers le chaud, mais seulement si la pression de vapeur est constante. Si, en hiver, la pression de vapeur d'eau est plus forte dans le foyer qu'à l'extérieur, elle va générer un flux contraire à travers la paroi : de l'intérieur vers l'extérieur. Une raison supplémentaire de mettre le foyer en légère surpression en hiver.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Synthèse : choix des familles d'isolants

Prix

Au vu de ses parts de marché, la laine de roche soufflée semble la plus compétitive.

Confort

En Provence, pour que les températures perçues par l'extérieur du mur mettent dix à douze heures à atteindre la surface intérieure (déphasage), on emploiera des isolants à base de fibres naturelles. C'est la solution qui apporte le plus de confort, surtout dans les climats qui connaissent de fortes amplitudes thermiques quotidiennes.

Humidité

Si l'humidité est importante ou relativement constante (surface de paroi enterrée, etc.), on utilisera des isolants phénoliques.

Pression

Le polystyrène extrudé est l'isolant qui propose les meilleures résistances à la pression. Il peut supporter jusqu'à 70 tonnes/m2 (il est étanche à la vapeur d'eau).

Perméabilité

Les différents composants d'une paroi perspirante devront être de plus en plus perméables à la vapeur d'eau ET le matériau de la couche extérieure devra être au moins cinq fois plus perméable que celui de la couche intérieure de la paroi.

Énergies grises

On privilégiera les isolants ayant une faible empreinte écologique et stockés dans un dépôt proche du chantier.

Isolants inclus dans des parpaings

Les fabricants de matériaux ont mis au point des éléments constructifs qui combinent résistance structurelle et capacité d'isolation. Leurs messages commerciaux soulignent leur capacité d'amortissement thermique, d'inertie ainsi que le déphasage assuré.

Du point de vue thermique, les parpaings en béton de ciment qui comprennent des lames de polystyrène doivent être envisagés en considérant la succession des ponts thermiques qui apparaissent à l'union de chacun des éléments (les caméras thermiques ne montrent pas des façades de couleur homogène, mais des pointillés de taches jaunes sur une dominante rouge).

Le polystyrène peut être parfaitement adapté pour un climat autrichien, anglais ou normand. Il ne l'est pas pour le midi de la France (sauf pour des parois enterrées ou recevant beaucoup d'humidité). Il présente surtout le défaut d'être à peu près parfaitement étanche à la vapeur d'eau, ce qui implique de compenser le surcroît de vapeur d'eau dans les logements par des ventilations motorisées.

Quelle épaisseur choisir pour un déphasage de douze heures ?

Les caractéristiques des matériaux varient selon les fabricants, mais typiquement on peut se baser sur les valeurs suivantes : 12 h de déphasage correspondent à 31 cm de béton cellulaire, à 24 cm de béton de pierre ponce ou bien à 22 cm de briques Monomur.

Or il faudrait une épaisseur de 37 cm de brique Monomur pour obtenir une isolation équivalente à 15 cm d'isolant. Il n'y a donc aucune chance d'obtenir une isolation conforme aux normes passives tout en déphasant les températures de 12 h avec un mur en briques Monomur (la RT 2012 impose un

Copyright © 2016 Eyrolles.

Ordres de grandeur de l'énergie grise des matériaux d'une paroi (exprimée en kWh/m³)			
aluminium	190 000	panneau fibre de bois (dur)	3 800
cuivre	140 000	panneau aggloméré	2 200
acier	60 000	panneau de plâtre	900
PVC	27 000	panneau fibre de bois (tendre)	1 400
béton armé	1 850	polystyrène extrudé	850
béton	500	polystyrène expansé	450
béton cellulaire	200	panneau de liège	450
brique perforée	700	argile expansée	300
enduit synthétique	3 300	laine de verre	250
enduit ciment	1 100	perlite	230
enduit plâtre	700	laine de roche	150
enduit à la chaux	450	laine de mouton	55
bois lamellé collé	2 200	cellulose	50
bois d'œuvre	180	fibres de chanvre	40
panneau contre-plaqué	4 000	fibres de lin	30

R au moins égal à 5, donc une épaisseur de 20 cm, ce qui, pour les briques Monomur, correspond à un déphasage de 9 heures seulement).

Par contre, si on ajoute une isolation appropriée, il est possible d'atteindre une résistance thermique de la paroi de 5 ou 6 ET de déphaser les températures de 36 h. En d'autres termes : la température transférée à la face intérieure d'une paroi à 15 h sera celle qui proviendra de la température qui avait été reçue par la face extérieure de cette paroi à 3 h du matin l'avant-veille. Cette isolation additionnelle pourra intéresser les propriétaires de maisons construites vers 2005 qui avaient opté pour des Monomur de 30 à 37 cm d'épaisseur. Ils pourront mettre leur bâti aux normes passives tout en adaptant ce type de mur au climat provençal.

Quand on souhaite construire des bâtiments passifs qui dureront un siècle ou plus, on s'intéresse à la durabilité des matériaux employés et on constate vite que les fabricants d'isolants ne peuvent apporter aucune garantie au-delà de vingt ans. Cette limite implique que l'isolant doit rester facile d'accès en tout point (parois démontables) de façon à ce qu'un jour on puisse le changer (voire l'améliorer).

Pour s'engager sur vingt ans, les fabricants exigent une protection parfaite des isolants contre les chocs, rongeurs, insectes, etc., infiltrations d'eau et différences de pression.

Isolant déphasant 12 heures

Si l'on considère que le déphasage (D) dans un matériau est constant au fur et à mesure de son épaisseur (ce qui est à peu près exact), on peut partir de D (en heures) = 1,38 e $\sqrt{(\rho c/\lambda)}$. Par hypothèse, D = 12 h et λ est peu différent de 0,04. Auquel cas, e = 1,739 / $\sqrt{\rho c}$.

Copyright © 2016 Eyrolles.

3. Logiciels de simulation thermique

Pour évaluer les risques de condensation dans les murs, les ingénieurs appliquaient il y a peu des méthodes de calcul statiques et considéraient que la condensation avait lieu exactement au moment où l'on passait la valeur d'humidité relative de 100 % (cf. norme NF EN ISO 13788). Ces calculs s'appuyaient sur la valeur moyenne des températures mensuelles. Les choses ont évolué : les logiciels se basent maintenant sur des températures au pas horaire (8 760 relevés de température par an)

Ce progrès technologique néglige cependant plusieurs facteurs, par exemple :

- Le cheminement de la vapeur à travers une paroi n'est pas instantané : sa vitesse de diffusion est généralement relativement lente. Les parois en ciment, du fait de la capillarité à travers leurs alvéoles, accélèrent ce transfert de la vapeur d'eau. Ces alvéoles, comme celles des isolants, ont une forme plus ou moins arrondie. Or la forme de la courbure influe sur la répartition de la pression au sein d'une alvéole. Aussi, des phénomènes de condensation apparaissent avant que la valeur moyenne des HR (humidité relative) de la paroi n'atteigne 100 %.
- Dans le Luberon (Vaucluse), la paroi ouest des bâtisses est soumise à un vent sec (le mistral), alors que la façade est reçoit directement de l'air froid et humide. Le calcul reste le même, les logiciels proposent aussi le même résultat quand bien même on aurait placé une pièce tampon en est ou une haie de cyprès en ouest.
- Dans le cas d'une paroi (int. vers ext.) « OSB (μ = 75) ; 20 cm d'ouate de cellulose ; Agepan DWD (μ = 2) », il n'y aura jamais de point de rosée, puisque l'Agepan DWD est quinze fois plus perméable à la vapeur d'eau que le panneau d'OSB. Mais si, au lieu de l'Agepan, on plaçait le même matériau sur la paroi interne que sur celle externe (la ouate de cellulose serait donc enfermée entre deux panneaux d'OSB), alors l'humidité serait permanente et la paroi ne pourrait s'assécher. Mais le logiciel de calcul ne le prend pas en compte : il calculera un point de condensation, heure après heure, comme si l'isolant conservait la conductivité thermique optimale propre à son matériau. De fait, en s'humidifiant, l'isolant aura perdu de son efficacité thermique et aura fini par se tasser dégageant des zones non isolées.
- L'apparition des logiciels de simulation thermique (et, en particulier, le logiciel réglementaire) constitue une avancée technologique considérable. À quelques nuances près, ces outils informatiques permettent des mesures précises sur chaque point singulier, bien que ces « nuances » ne soient pas toujours négligeables.

4. Isolation : expériences

- Les constructeurs suédois connaissent bien le froid. Lorsqu'ils isolent un plafond sous les combles, ils posent les panneaux d'isolant en deux couches croisées (ce procédé, le sarking, diminue les ponts thermiques). Mais, entre chacune des deux couches, ils placent une feuille de papier kraft (perspirante). Celle-ci a tendance à immobiliser l'air à l'intérieur de chacune des couches d'isolant, préservant ainsi l'efficacité thermique de l'isolation lorsque les vents créent des surpressions dans les combles.
- Un vent froid et humide fait diminuer l'efficacité thermique d'un isolant léger alors qu'il a peu d'impact sur un isolant dense.
- La durabilité de l'isolation des combles, qu'elle soit réalisée par panneaux d'isolant accolés ou par soufflage, peut être améliorée en posant sur la surface de l'isolant des feuilles de carton qui ont été « mouillées » avec de l'huile de karité (dont l'odeur éloignera les termites qui auraient pu être tentés par la charpente), ce qui protège

Copyright © 2016 Eyrolles.

la surface de l'isolant des variations d'humidité dans l'air des combles.

- Lorsqu'on fixe une plaque de plâtre sur un panneau avec des plots de colle, il se forme nécessairement une couche d'air entre le plâtre et le panneau. Si cet intervalle est supérieur à 1,5 cm, il se créera un mouvement continu de convection de l'air qui tendra à annuler l'efficacité isolante de la plaque de plâtre. Même en dessous de 1,5 cm, l'absence de contact parfait entre le plâtre et le panneau rompt la continuité du transfert de vapeur. La plaque de plâtre reste un frein-vapeur, mais il se formera une condensation entre la plaque de plâtre et le panneau. On retrouve ce problème lorsqu'un isolant rigide est placé directement contre un mur en parpaings : il y a toujours aux joints des bavures de ciment qui créent un interstice (donc une lame d'air).
- Les fabricants de maisons en bois utilisent souvent des panneaux d'OSB comme frein-vapeur (ce qui suppose que les jonctions des panneaux d'OSB soient couvertes de bandes collantes étanches à l'air).
- L'utilisation d'isolants étanches à la vapeur d'eau dans les combles est une mauvaise idée, puisque, dans un foyer, l'essentiel de la vapeur d'eau que nous émettons est chaud. Elle tend naturellement à s'évacuer essentiellement vers le haut, les plafonds, les combles. Si cet isolant est traversé par des pièces en bois de la charpente, celles-ci vont fonctionner comme des mèches, des ponts hydriques et elles vont se détériorer. La réglementation allemande interdit maintenant que plus de 50 % du bois d'une charpente (en particulier, les fermettes) soit couverts par un matériau étanche à l'air.
- Lorsqu'on appuie les pieds d'une charpente neuve sur une paroi à base de chaux, il est recommandé de placer une feuille en plastique à l'interface. Elle empêche l'humidité contenue dans le mur de mouiller le bois de la charpente, en particulier là où il est le plus vulnérable aux champignons : à sa coupe.
- On ne devrait utiliser d'enduit extérieur étanche à la vapeur d'eau que sur les parois isolées par des isolants phénoliques (puisque ce sont eux-mêmes des pare-vapeur presque parfaits).
- Lors d'une isolation par l'intérieur, il faut éviter d'utiliser un pare-vapeur et préférer un frein-vapeur ou, mieux encore, un frein-vapeur hygrovariable.
- La ventilation traversante d'un toit doit éviter autant que possible les axes des bois de la charpente : le vent causerait une accélération de leur vieillissement (dans les zones humides, il favorise l'apparition de champignons ; dans les zones sèches, il fend les poutres).
- Du fait des dilatations-rétractations du métal des tuyaux d'eau chaude, un frein-vapeur rigide placé à l'intérieur d'une salle d'eau finira toujours par laisser des interstices à proximité de tous les canaux. L'humidité s'engouffre dans ces fuites. Centrées sur les tuyaux d'eau chaude, de grandes colonies bactériennes se développent, sauf si chaque passage de tuyau est spécifiquement rendu étanche par des joints souples.
- La conductivité thermique du polyuréthane augmente considérablement lorsqu'il est humide. On ne peut donc le projeter sur un ciment humide (c'est-à-dire dans les deux premières années du coulage d'une dalle de béton) sous peine d'être très déçu par ses qualités thermiques. Pour remédier à cet inconvénient, certains fabricants proposent des panneaux de polyuréthane couverts d'une feuille d'aluminium. L'isolant est effectivement protégé par cet écran de l'humidité du béton, mais... il se produit une réaction chimique entre le ciment et l'aluminium qui rend ce dernier poreux à l'eau !
- S'il n'est pas protégé par une lame d'air, l'action des dépressions-surpressions causées par le vent sur un toit abîme irrémédiablement les isolants en laine minérale fixés sous celui-ci

Copyright © 2016 Eyrolles.

(rampants). À chaque rafale, des dizaines de milliers de minuscules fibres de verre ou de roche cassent. Au bout de quelques années, les cavités emplies d'isolant sont pleines de poussière au pied et vides en haut. L'isolant s'étant tassé vers le bas, il forme un pont thermique en bas et n'isole plus en haut.

- Le principe du « masse-ressort-masse » reste celui qui isole le mieux des bruits extérieurs. L'isolation phonique d'un bâtiment sera nettement améliorée si la masse souple (« ressort ») de l'isolant se trouve enserrée entre une « masse » de ciment (ou autre minéral) et une « masse » à base de bois (panneau de fibres compressées, OSB).
- Théoriquement, l'apparition de champignons du bois commence dès 5 °C et 20 % d'humidité relative. Dans la pratique (cf. forme des vacuoles), on constate l'apparition fréquente de moisissures (bactéries) à partir de 18-20 °C pour une humidité relative de 80 %. Une légère condensation dans une paroi qui serait absorbée par un matériau à base de bois n'entraîne généralement pas l'apparition de moisissures si elle a lieu en hiver (le point de rosée étant très inférieur à 18 °C). En règle générale, lorsqu'on conçoit une paroi, il est prudent de considérer que le point de rosée correspond à 80 % d'humidité relative (et non pas 100 %). On notera que le pH très alcalin (entre 11 et 12) de nombreuses laines de bois empêchent théoriquement l'apparition de champignons dans tous les cas de figure (ce n'est pas le cas du lin, du chanvre ou de la chènevotte).

Rénovation avec isolation sous le climat provençal

L'ajout d'un isolant complémentaire à l'extérieur d'une paroi en briques Monomur impose qu'il soit encore plus perméable à la vapeur d'eau que la terre cuite. On ne peut donc employer que des isolants naturels. Pour les fixer à la structure, il faudrait théoriquement percer les briques. Or la brique monomur est constituée de fines parois séparant des alvéoles d'air. Ces parois internes sont très fragiles. Il faut donc recourir à des fixations par chevilles chimiques, ce qui suppose une pose soignée (précise, lente, onéreuse). La pratique conseille donc de prendre appui, autant que possible, sur les fameuses poutres de béton que nous impose la réglementation sismique.

Si la pose des briques Monomur a été peu scrupuleuse (fuites excessives au test de la porte soufflante), on pourra protéger une membrane anti-air située entre la paroi et l'isolant.

En Provence, les parois nord et ouest gagnent généralement à être surprotégées par une lame d'air ventilée. Le bardage qui la définit protégera l'isolant de l'impact direct des rafales du mistral (au nord) ou de l'irradiation directe sur l'isolant (en ouest). Cette lame d'air sera toujours supérieure à 2,5 cm d'épaisseur (idéalement, entre 5 et 20 cm). C'est donc le bardage qui sera enduit pour ces deux façades. S'il est constitué de panneaux à base de bois, il sera couvert d'une nappe continue de grillage tendu. Celle-ci stabilisera l'enduit et évitera les microfissures, tout en ajoutant une protection mécanique complémentaire.

5. Monomur : expériences

- Une cave vinicole de Mazan avait construit un point de vente en briques monomur de 37 cm. Lors de la dernière période caniculaire, ils se sont vus obligés de déménager tout leur vin dans leurs chais : le thermomètre était monté jusqu'à 26 °C à l'intérieur du magasin.
- Le Monomur est caractérisé par une forte capacité calorifique. Il offre naturellement un fort pouvoir régulateur des températures. Cet amortissement explique qu'on lui accole l'étiquette « d'isolation répartie ». Une approche à peine simplificatrice permet de constater que la tem-

Copyright © 2016 Eyrolles.

pérature transférée à l'intérieur d'une paroi est très proche de la moyenne des températures extérieures quotidiennes. En d'autres termes : s'il a fait 12 °C la nuit et 28 °C le jour, la température restituée à l'intérieur est très proche de 20 °C (agréable) ; par contre, si la face externe de la paroi a atteint 19 °C la nuit et 36 °C le jour (façade ouest), alors la température transmise à l'intérieur avoisine les 26,5 °C (beaucoup trop chaud pour le vin).

- Monsieur X s'est fait construire une maison en Monomur, sur le plateau de Sault. Il s'est fâché avec son entrepreneur : il lui reproche d'avoir considéré les briques Monomur comme des parpaings de ciment (une analogie de formes, sans doute). Il a pris des photos du chantier qui montrent des espaces dépassant le centimètre, totalement vides, entre certaines briques monomur. D'autres ont été cassées à la truelle (et non pas sciées) et vaguement jointoyées avec de la colle.
- Monsieur X avait choisi le devis le moins cher. Il a donc jeté son dévolu sur une entreprise de maçonnerie dont l'expertise allait vers l'empilement rapide de parpaings de béton. Les ouvriers ont étrenné les appareils de pose de joints minces sur son chantier. Pour le reste, ils ont travaillé comme d'habitude et ont estimé de bonne foi que l'enduit permettrait de rattraper de « petites » erreurs de pose. L'entrepreneur a même précisé que l'on ne pouvait légalement pas lui reprocher les approximations inférieures à 5 cm. De fait, Monsieur X escomptait une précision inférieure au millimètre en contractant avec une entreprise qui estimait qu'un maçon disposait, légalement, d'une latitude cinquante fois supérieure. Quand les habitudes professionnelles du XX^e siècle se heurtent aux exigences du XIX^e siècle !
- Un habitant du nord d'Avignon s'est plaint que, lorsque le mistral souffle en rafales, son Monomur nord émettait une espèce de vrombissement grave, peu violent mais qu'il trouvait très gênant.
- Le mistral exerce des pressions énormes sur un mur nord non protégé, quand ses rafales dépassent les 90 km/h. Lorsque, par hasard, celles-ci soufflent à un rythme répété, les surpressions à l'intérieur des alvéoles du monomur peuvent faire entrer sa structure en résonance, d'où ce bruit sourd qui agace tellement cet habitant du Pontet. Accessoirement, la structure minérale des briques Monomur transmet les bruits, mais leur conduction suit nécessairement un cheminement compliqué, trois à quatre fois plus long que le mur n'est épais, ce qui confère à la paroi un excellent niveau d'isolation aux bruits aériens.
- La gérante d'un établissement de soins à Pertuis avait opté pour la brique Monomur parce qu'elle avait été séduite par sa promesse de confort thermique. Elle a été étonnée de constater que le déphasage de son Monomur de 37 cm était nul. Pour arriver à cette conclusion, elle a relevé et comparé la température interne du mur de son domicile et celle de son établissement de soins.
- Des briques Monomur de 37 cm d'épaisseur affichent un déphasage de vingt-quatre heures. En d'autres termes, la température transférée à l'intérieur à 15 h correspond à celle perçue par la paroi extérieure la veille à la même heure. Cet établissement ne profite donc nullement du fait que les nuits sont toujours bien plus fraîches que les jours à Pertuis. Les parois de la vieille bâtisse qu'habitait la gérante, affichaient des déphasages de douze heures, d'où son étonnement.
- Un thermicien des Angles (qui manie avec dextérité la caméra thermique) fait remarquer que la réglementation sismique a imposé des poutres longitudinales en béton ferraillé dans les murs. Elles apparaissent sur les façades en monomur comme de larges ponts thermiques linéiques.

Ces grandes bandes de béton armé encadrent les parois à chaque niveau habitable. Or le béton armé

Copyright © 2016 Eyrolles.

affiche un λ dix fois supérieur à celui de la brique monomur. Les poutres de béton armé se situant au niveau des dalles de plancher et des angles de mur, les ponts thermiques additionnels sont très importants, même si on a employé les très onéreux rupteurs de ponts thermiques actuellement sur le marché. La réglementation sismique s'oppose donc à deux des grandes qualités du procédé de construction à base de briques monomur : le traitement des ponts thermiques et l'isolation répartie.

Principales caractéristiques des matériaux

λ, R et U sont directement liés :

- la conductivité thermique λ (W/m.K) mesure la capacité d'un matériau à conduire la chaleur (plus λ est élevé, moins le matériau est isolant) ;
- la résistance thermique R (K/W) : R = e/λ détermine le pouvoir isolant de l'épaisseur d'un matériau (plus R est élevé, plus cette couche de matériau est isolante) ;
- le coefficient de déperdition (surfacique) U (W/m^2.K) est le pouvoir isolant d'une paroi composée de plusieurs matériaux. U = ∑i 1/Ri (plus U est élevé, moins la paroi est isolante).

L'effusivité thermique (W/h.m^2.K) représente la vitesse (m/h) à laquelle un matériau se réchauffe (W/m^3.K) (plus l'effusivité est élevée, plus le matériau met de temps à se réchauffer). L'effusivité d'un matériau conditionne sa capacité à amortir l'onde thermique.

Le déphasage thermique est le temps nécessaire pour que le flux calorifique arrivé d'un côté de la paroi traverse cette paroi. Il dépend de la diffusivité et de la capacité thermique du matériau :

- la diffusivité thermique (m^2/h) représente une vitesse de déplacement des calories à l'intérieur d'un matériau (« la profondeur de pénétration ») ;
- la capacité thermique ρC (Wh/m^3.K) et l'inertie thermique (Wh/m^2.K) mesurent la capacité qu'a un matériau à stocker la chaleur (plus ρC est élevé, plus le matériau peut stocker de calories).

La densité ρ, encore appelée « masse volumique », est le simple rapport entre la masse du matériau et son volume (kg/m^3). Un matériau humide pèse plus lourd qu'un matériau sec, puisqu'à sa masse intrinsèque, il faut ajouter l'eau qu'il abrite.

Les matériaux à forte densité affichent généralement une forte capacité et une faible résistance thermiques. Les minéraux lourds (pierres, terre crue, etc.) protègent mal du froid et un peu mieux du chaud ; par contre, leur inertie permet d'équilibrer les variations de température qu'ils subissent : si le plus haut du jour a atteint 30 °C et le plus froid de la nuit 14 °C, un matériau accumulé en quantité suffisante pour assurer une inertie quotidienne restituera toute la journée une température à peu près constante de (30 °C + 14 °C)/2 = 22 °C.

Empirisme, histoire

Les humains du Néolithique amoncelaient d'épaisses nappes de roseaux sur les toits de leurs huttes (8 500 av. J.-C.). Les Provençaux utilisaient aussi le roseau, mais le plaçaient sous le sol de leurs habitats, recouvert d'une couche de charbon de bois (7 000 av. J.-C.). Au Moyen Âge, en hiver, on se servait du grain ou de la paille en quantité pour protéger les plafonds du froid.

Il a fallu l'industrialisation pour « inventer » les isolants modernes. Les laines minérales (amiante, laine de roche, laine de verre) inondèrent les constructions avant que les progrès de la chimie ne nous permettent de créer les isolants phénoliques (polystyrène, polyuréthane, isocyanurate...). Puis, on mit au point les procédés techniques qui permirent de produire des isolants végétaux efficaces (liège, laine de bois, fibres compressées, ouate de

Copyright © 2016 Eyrolles.

cellulose, lin, chènevotte, coton). Enfin, les isolants à base animale sont apparus sur le marché (laine de mouton, plumes, etc.).

L'apparition d'isolants affichant un λ inférieur à 0,05 est donc très récente. Trop récente pour que nous puissions tirer le fruit de siècles d'expérience.

La formation des architectes, depuis la Seconde Guerre mondiale, les a incités à utiliser des formes et des masses rythmées. L'esthétique des bâtiments récents s'est appuyée sur les caractéristiques techniques du matériau qui règne depuis lors : le ciment. On a vu se multiplier des rentrants, des aplombs, des découpes originales... et l'emploi de l'acier, de l'aluminium et du verre : autant de choses qui compliquent la mise en œuvre des isolants. Mais, surtout, notre œil s'est tellement habitué à voir des parois de 20 cm d'épaisseur que le public considère avec circonspection des murs de 52 voire 60 cm d'épaisseur.

C'est pourtant l'épaisseur qu'avaient les parois des bâtiments de nos anciens. Les équilibres esthétiques des vieux mas pourraient se retrouver dans l'architecture de demain.

Rénovation

A priori, lorsqu'on entreprend des travaux de réhabilitation, on vise à l'amélioration du bâti. Or, diverses déconvenues nous ramènent parfois à la dure réalité. En effet, une intervention mal pensée peut favoriser l'apparition de pathologies, notamment structurelles et sanitaires, jusque-là inexistantes sur le bâti.

Prenons pour exemple la ventilation : la plupart des artisans considèrent que les pièces tampons, étant situées en dehors de l'espace chauffé, se trouvent à l'extérieur du bâti.

En dirigeant l'évacuation d'une ventilation vers les combles, ils préchauffent ce volume tampon. Mais, s'ils n'ont pas vérifié que la ventilation naturelle des combles était suffisante, ils vont générer des dysfonctionnements qui peuvent être redoutables. En effet, les taux d'humidité dans les combles vont croître et les risques de condensation augmenter. Les éléments de charpente et de solivage en bois, jusqu'alors suffisamment ventilés, risquent de se voir attaqués par des champignons, et peuvent rencontrer des problèmes de pourrissement, de vieillissement accéléré et donc de fragilité structurelle du toit. Les prises d'air situées en haut de larges couloirs ne posent pas problème jusqu'à ce que l'on édifie un placard devant. Alors, l'humidité et les poussières s'accumulent dans l'espace tampon que forme le placard. Au bas de celui-ci, on risque de rencontrer des problèmes de moisissures.

Les meubles bas ou les machines à laver placées devant les arrivées d'air des salles de bains provoquent habituellement la prolifération de grandes colonies de bactéries.

Le recours à la ventilation ne peut qu'être valorisé du point de vue hygiénique, le problème se situe plutôt au niveau d'une conception initiale insuffisamment précise. Or le couvreur, le ventiliste et le menuisier travaillant à différentes étapes du chantier ne se rencontrent pas. Les travaux de réhabilitation devraient donc être pensés et suivis par un professionnel qui a une vue générale sur tous les travaux envisagés et leurs implications.

Copyright © 2016 Eyrolles.

ANNEXE 2 : LES ANTISÈCHES

La terre de France a été particulièrement favorisée depuis le Moyen Âge : son sol était riche et l'eau abondante. Les campagnes et leurs productions agricoles alimentaient l'économie. De la colonisation romaine jusqu'à Saint Louis (1250), il nous reste peu de constructions, surtout des ruines. Par contre, les six siècles qui ont suivi, de 1250 à 1850, nous ont légué une foule de bâtiments encore debout. Un grand nombre de mas, bastides, châteaux et maisons de cette époque se dressent encore malgré leur grand âge.

Les vieux bâtiments de nos campagnes sont autant d'antisèches, légués par les mestres qui nous ont précédés. Il nous suffit d'observer leurs caractéristiques pour être renseignés sur la configuration bioclimatique la mieux adaptée au microclimat de l'endroit. Inversement, certains détails constructifs renseignent sur le climat ressenti par la maison ancienne que l'on visiterait en vue d'une acquisition.

Telle forme de génoise indique la force du vent et l'humidité perçue par son mur porteur. Telle épaisseur de paroi indique la rapidité de la chute des températures nocturnes. Telle cour ceinte indique des étés caniculaires, telle autre indique des potagers, une rosée abondante.

Les combustibles coûtaient cher pour des bourses peu remplies, ils étaient surtout destinés à chauffer les aliments. Accessoirement, l'âtre se trouvant dans la pièce principale, il apportait son énergie au logis. Pour chauffer la carcasse de leurs habitations, nos anciens disposaient surtout d'une source de chaleur inépuisable : le soleil. On construisait donc en fonction de sa course. Or, entre 1250 à 1850, le climat de la Terre a connu quelques variations.

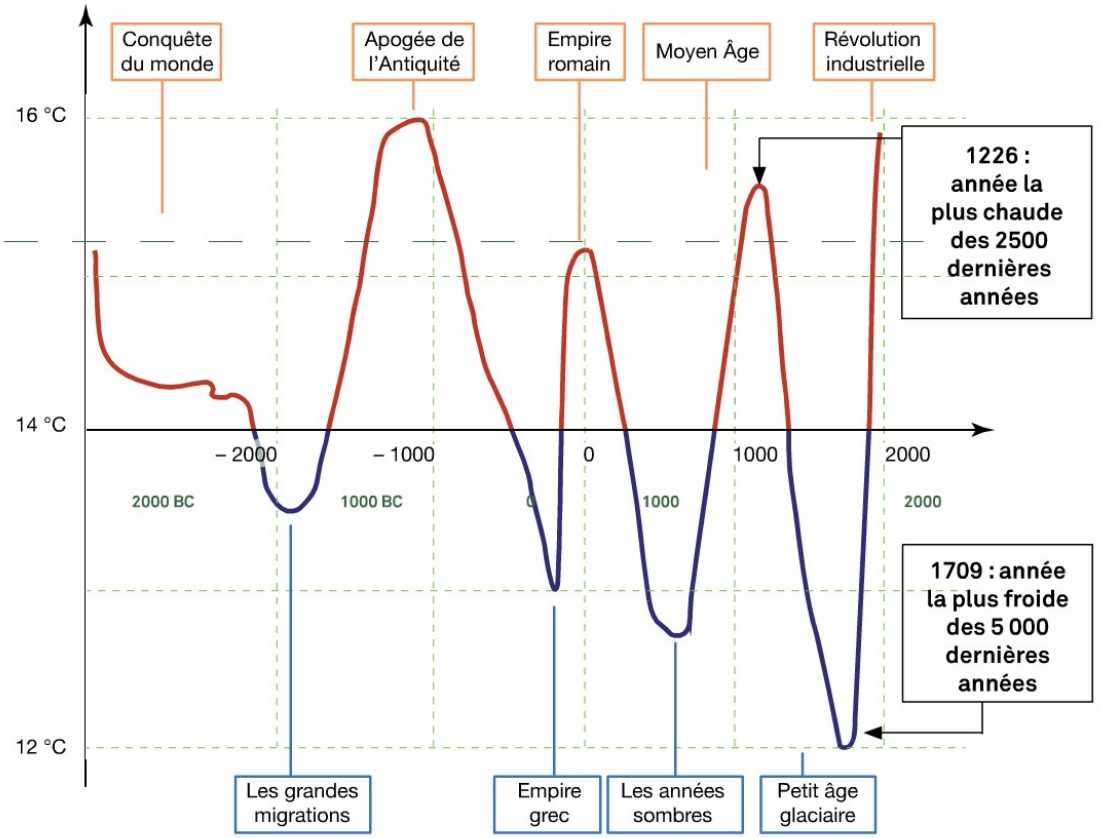
Échanges sur le bioclimatisme

Mail entrant : Monsieur, je viens de recevoir des plans de mon architecte (lyonnais) pour la maison que j'envisage de construire au Cannet (Var). J'ai un doute sur l'orientation qu'il a choisie. Pourriez-vous me donner votre point de vue ? Mail sortant : Monsieur, je ne connais pas précisément les détails du microclimat du Cannet. Avant de passer vous voir, pourriez-vous faire un tour en voiture (avec votre boussole) et noter l'orientation des bâtisses construites avant 1850 que vous rencontrerez ? Dans quelle direction regardent les baies de la pièce à vivre ? Mail entrant : Monsieur, mon épouse et moi avons fait comme vous aviez dit. On a vu une douzaine de bâtisses. C'est invraisemblable, toutes ces vieilles maisons sont construites exactement dans le même axe ! Elles sont toutes orientées à 5° à l'ouest du sud. Mail sortant : Eh bien, vous avez trouvé la solution : c'est certainement l'orientation idéale étant donné le microclimat local.

En 1250, il faisait chaud sur Terre. Les températures de l'Optimum climatique du Moyen Âge seraient les plus élevées que l'Occident ait connues depuis plus de 5 000 ans. La fête annuelle de la Fraise se tenait à Strasbourg en février, alors qu'aujourd'hui elle a lieu en avril à Carpentras. Les ruines du XIII^e siècle montrent des dispositifs destinés à capter la fraîcheur pour se protéger des canicules, tandis que les bâtiments de la fin du XVII^e siècle déploient toutes les astuces imaginables pour se prévenir du froid. À cette époque régnaient Louis XIV et le Petit âge glaciaire : le Rhône à Lyon était pris sous au moins un mètre de glace tous les ans ; à Paris, un édit régulait les flambées sur la Seine gelée ; en Provence, les froidures avaient déjà fait éclater tous les amandiers.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Lors de la chaleur de l'Optimum climatique du Moyen Âge, les bâtiments étaient édifiés selon une orientation à l'est du sud, tandis que lors du froid du Petit âge glaciaire, ils visaient à l'ouest du sud. Cette variation n'a jamais dépassé 30° d'un extrême à l'autre. L'orientation bien particulière de certaines bâtisses fait quelquefois exception : les moulins à eau, appuyés sur leur cours d'eau, étaient souvent abrités dans un creux, à l'abri du vent ; les moulins à vent, généralement ronds, abritaient parfois un logement du vent dominant plus que du froid. Par contre, certaines données restèrent constantes : les nuits étaient beaucoup plus fraîches que les jours ; il faisait plus froid à mesure que l'on montait en altitude ou que l'humidité était prégnante ; les vallées isolées des airs maritimes par un relief montagneux connaissaient des amplitudes plus importantes ; etc. Et ces constantes perdurent aujourd'hui.



Les températures actuelles sont à peine plus fraîches que celles que connaissaient nos anciens durant l'Optimum climatique du Moyen Âge. Cette courbe a été très simplifiée afin de faciliter la visualisation des tendances climatiques. Ce trait d'un siècle d'épaisseur masque le brusque réchauffement qui apparut entre 1400 et 1450, le refroidissement de plus d'un degré déclenché par les éruptions volcaniques majeures de 1810 et 1812 ou celui qui baigna l'Europe de 820 à 860.

Copyright © 2016 Eyrolles.

1. En altitude ou en haute latitude

Dans ces climats à hivers rigoureux, on trouve de petites cheminées dans les chambres lorsque la fraîcheur est surtout due à l'humidité du vallon, une abondance de cheminées et des plafonds bas lorsque la zone connaît des hivers longs, des cheminées prolongées par des banquettes maçonnées quand le lieu est soumis à des nuits tellement froides que couvertures et édredons ne suffisent pas toujours à assurer la chaleur nécessaire au sommeil.

À ces climats de haute latitude (45° nord) ou de haute altitude, il faut ajouter ceux qui sont protégés de la tempérance de l'air marin par un relief, par exemple : le plateau de Sault ou les Préalpes. Dans ces régions, l'irradiation reste forte, mais les nuits sont vite très fraîches. Les bâtiments anciens de ces régions ne déphasent pas les températures de douze heures, mais de six à huit heures. Pourquoi ?

L'apport d'énergie dû à l'irradiation durant les huit heures de jour, en hiver, ne suffisait pas à compenser la froideur des quatorze heures de nuit (même en acceptant une température de confort de 14 °C à l'intérieur du logis). Aussi les mestres ont-ils estimé que la température de confort pouvait être maintenue par des couvertures et des vêtements durant le sommeil. Il s'agissait donc de se servir de l'irradiation sur l'extérieur des parois pour réchauffer suffisamment les pièces principales mais seulement tant que la maisonnée était éveillée. En campagne, on se couchait relativement tôt, puisque la veillée consommait du feu et des chandelles (onéreuses). On couvrait les feux lorsque la cloche de l'église locale sonnait « le bonsoir » à la volée (« l'angélus » des moines), soit à 21 h. À partir du milieu du XIX^e siècle, on se couchera un peu plus tard (vers 23 h). Aussi, les bâtisses affichent un déphasage de six heures jusqu'au milieu du XIX^e siècle, puis huit de heures. Dans ces régions où les nuits d'hiver sont très froides, les parois sud-ouest des bâtiments ne mesurent donc que 25 à 35 cm d'épaisseur, beaucoup moins que dans le reste de la Provence (52 à 60 cm).

Les clochers des zones ventées de Provence sont souvent en métal. Au lieu d'affronter le vent de leurs masses de pierre, ils tentent d'en éviter la violence en le laissant passer entre leurs fers forgés. La présence de volutes signifie que les rafales de vent sont particulièrement violentes. Ici les génoises courtes et pleines annoncent un terrain relativement sec et le clocher avec volutes sur une tourelle crénelée, des vents violents susceptibles d'arracher les toitures.

Ce clocher entouré d'une barrière de métal créant peu de remous autour de la structure métallique indique des vents puissants, mais dont les rafales sont peu violentes.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Comment isoler dans les régions de haute latitude/altitude ?

Étant donné nos modes de vie actuels, on privilégiera un déphasage de huit heures plutôt que de six.

Construction neuve : une résistance thermique de 5 sera associée à un déphasage très supérieur à six-huit heures si on utilise des isolants à base de bois. On fera donc usage de laines minérales (à condition de bien les protéger !) ou même d'isolants synthétiques. Une meilleure solution consiste à employer des semi-isolants minéraux (vermiculite, brique Monomur, etc.) et à viser un déphasage d'une journée de plus, soit trente à trente-deux heures. Attention : c'est l'orientation sud-sud-ouest qui assure l'essentiel de l'apport thermique destiné à réchauffer les soirées ; cet axe étant source d'inconfort thermique en été, il faudra veiller à lui assurer un ombrage suffisant (ombrières et/ou végétaux caducs). Dans tous les cas, la façade captrice devra être abritée du vent d'hiver et de ses remous.

Rénovation : on n'a d'autre choix que de viser un déphasage de trente-deux heures. On sera vigilant quant à l'état de la pierre de la façade. Si le bâtiment est ancien, ses premiers centimètres ont généralement perdu leur capacité thermique. Une pierre exposée aux intempéries depuis deux, voire trois cents ans peut avoir perdu de sa consistance sur cinq à six centimètres d'épaisseur. Il faudra prendre en compte cette perte de matière dans les calculs de déphasage et pour le dimensionnement de l'isolant choisi.

Chauffage d'appoint en zones froides

À l'inverse du reste de la Provence, la façade exposée au sud affiche un bilan thermique hivernal négatif dans ces régions, c'est-à-dire qu'en hiver

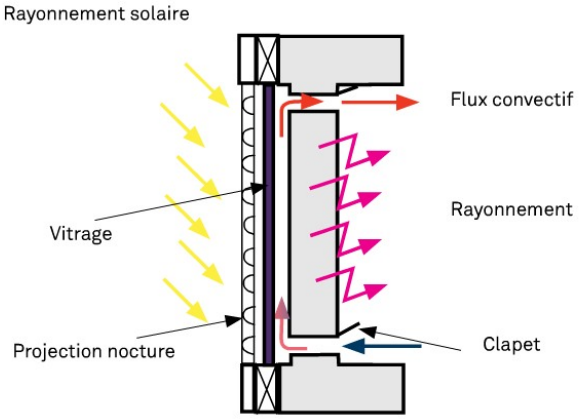


Schéma du mur Trombe d'après le site de l'Ademe. Trois détails n'y figurent pas :
• La surface cumulée des ouvrants (clapets) doit représenter au moins 3 à 5 % de la surface totale du mur.
• Le flux convectif sera plus puissant si la partie haute de la lame d'air est arrondie par un joint souple ou un mastic. Et si la surface du clapet haut est supérieur à celui d'en bas.
• La partie basse doit être poreuse (ciment brut, bois, etc.).

l'apport d'énergie dû aux rayons solaires s'avère inférieur à celui des pertes thermiques dues à l'échange de la paroi avec l'air froid de la nuit. Cet effet est encore amplifié si le vent léchant la façade vient multiplier les pertes par convection. On est donc tenté de protéger ces façades sud par un double vitrage (serre). Ce serait efficace, mais pas assez confortable. Dans ces régions, en effet, la sensation de froid arrive très rapidement après la tombée de la nuit. Elle est presque brutale. Dès que l'irradiation cesse, la fraîcheur s'installe et augmente très vite, alors que les corps des habitants sont encore habitués à la chaleur. La notion de confort demande donc un apport tout aussi rapide d'air chaud. C'est ce que permet un procédé de mur capteur particulièrement efficace : le mur Trombe.

Le mur Trombe a été inventé dans les années 1970 par Félix Trombe et Jacques Michel (Pyrénées). Durant la journée, le soleil a chauffé le mur capteur à travers la vitre, laquelle a amplifié ce mécanisme en bloquant les infrarouges de

Copyright © 2016 Eyrolles.

longues ondes émis par la pierre (effet de serre). Les rayons solaires ont aussi échauffé la lame d'air qui se trouve entre la vitre et la paroi.

Lorsque la nuit vient de tomber et que le froid se fait pénétrant, on ouvre les clapets. L'air chaud entre dans la pièce à vivre. L'air le plus frais du logis se trouve près du sol, il est attiré par la zone chaude qui se trouve entre la vitre et la paroi, il passe le clapet bas et se dirige vers le point le plus chaud (le haut de la lame d'air), il capte au passage les calories présentes sur la surface extérieure de la paroi et... est poussé par l'air qui le suit, entre dans la pièce (flux convectif).

Le mur Trombe permet, d'une part, d'utiliser la convection pour réchauffer rapidement l'air du logis à la tombée de la nuit et, d'autre part, de chauffer la pièce à vivre par conduction (comme tout mur capteur) avec un déphasage de huit heures. La quantité d'énergie déphasée sera amplifiée si la face externe du mur est peinte en noir ou en rouge sombre.

Store, volet roulant ou volet bois traditionnel : la protection nocturne évite que les courants d'air dus au vent viennent enlever des calories au double vitrage et donc à la lame d'air interstitielle. Ils sont aussi utilisés durant tout l'été pour garantir de l'ombre au mur Trombe (y compris à la lumière diffuse), surtout si on a installé un double vitrage à haute performance (Ug inférieur à 1,1).

De l'humidité, provenant de la pièce principale, pourrait entrer dans la lame d'air interstitielle, avec le flux ascendant continu, et y demeurer. Elle se condenserait à l'intérieur de la vitre, provoquant la formation de buée (laquelle ferait partiellement écran aux rayons solaires). Il est donc important que le point bas soit constitué d'un matériau poreux. En général, on choisit le bois. Une surface de mur Trombe de 10 m^2 assure le chauffage d'un bâtiment de 250 m^3 dans la Drôme. Ses habitants disent qu'en dix ans, ils n'ont jamais éprouvé le besoin de recourir au chauffage au gaz dont ils disposent.

« Mines », « caverno », « baumo »

« Les galeries drainantes sont les aménagements de captage des eaux souterraines les plus utilisés dans les piémonts provençaux. Ces galeries, appelées en provençal « mines », « caverno », « baumo », représentent une technique de captage qui consiste à drainer par gravité les eaux d'infiltration et à les amener jusqu'à l'air libre pour irriguer des cultures ou alimenter des fontaines ou lavoirs. Conçues pour atténuer les contraintes bien spécifiques au monde méditerranéen – pluviométrie médiocre à l'automne et au printemps, rareté des eaux de surface –, elles sont capables de produire un débit plus ou moins important, mais constant en toute saison, en particulier en été lorsque les cultures exigent d'être arrosées. La technique particulière de la galerie drainante est à l'origine une technique minière d'exhaure mise au point, vraisemblablement dès le IIe millénaire av. J.-C., sur le plateau iranien ou en Arménie. En Provence, un certain nombre de conditions naturelles et économiques conjointes ont permis le développement de ce type d'aménagement. »

Extrait d'un texte de Danièle LARCENA, géographe

2. Le puits provençal

Au XVIIIe siècle, des émigrés provençaux au Québec montrèrent aux Canadiens (des émigrés un peu plus anciens) comment fonctionnait le puits provençal. Il s'agissait de rafraîchir en été. Mais les autochtones comprirent vite que l'on pouvait appliquer ce principe pour apporter des calories en hiver.

Deux solutions différentes pour un procédé constructif similaire

Il s'agit de profiter de l'amortissement des températures dû à la masse thermique terrestre. À sept

Copyright © 2016 Eyrolles.

À noter

Les puits provençaux rafraîchissaient généralement la paroi d'une pièce tampon (cave ou cellier), parfois l'air d'une grange, mais jamais l'air de la pièce principale.

mètres sous le sol, la température est constante. Mais, pour rafraîchir leurs demeures, les Provençaux amplifièrent ce phénomène en se servant de la très refroidissante évaporation de l'eau à l'ombre.

Il pleut deux fois plus sur le mont Ventoux qu'à Arles, parce qu'en Provence, les rares élévations importantes « arrêtent » les nuages. Depuis l'Optimum climatique, et durant tout le Moyen Âge, la conquête des eaux des monts a été une tâche imposée par les nobles à leurs gens. On a creusé la terre pour récupérer toute l'eau de ruissellement, on l'a concentrée en faisant converger ces rigoles dans des canaux couverts jusqu'à des réservoirs naturels ou artificiels qui alimentaient champs et fontaines. Ce réseau maçonné comporte des centaines de kilomètres de « tuyaux enterrés » dont les plus petits mesurent une coudée tandis que les plus importants avoisinent 1,50 m de diamètre. Dans chacune de ces galeries drainantes, une faible pente véhicule l'eau vers l'aval, à chaque orage. C'est un milieu humide, souvent traversé par un très léger courant d'air dirigé du bas vers le haut qui évapore de l'eau fraîche à l'ombre. L'air y est froid. Les mestres se sont dit que si l'on pouvait creuser un conduit entre ces galeries drainantes et une maison, on la refroidirait. Ils avaient raison. En hiver, il suffisait de fermer le conduit par une planche pour que l'air de la galerie ne rafraîchisse plus la bâtisse.

Le puits provençal originel se résume donc à un conduit orienté vers le haut qui relie un « baumo » humide (où s'évapore de l'eau) à la maison.

Ne disposant plus des galeries drainantes de nos anciens, on peut utiliser l'évaporation d'un puits ou d'une citerne à l'ombre. On pourrait aussi tirer parti de la fraîcheur de la terre pour y enfouir profondément un conduit ; il apporterait d'autant plus de fraîcheur que de l'humidité s'y évaporerait. Avec nos matériaux modernes, nous pourrions reproduire un tel mécanisme et donc rafraîchir une maison. Mais le captage de l'air se ferait à température ambiante (au lieu d'un air déjà refroidi par des kilomètres de canalisations). Ce qui change tout !

La légionellose est une bactérie qui se développe dans l'eau stagnante ente 25 et 43 °C. Dans la mesure où la prise d'air (supposons à 38 °C, en plein été) se trouve proche du bâtiment (où l'air rafraîchi arrivera à 18 °C), une portion du conduit se trouvera nécessairement à une température comprise entre 25 et 38 °C. Il y a donc un risque de légionellose. Forts du principe de précaution, les pouvoirs publics ont formellement interdit d'utiliser le rafraîchissement dû à l'évaporation de l'eau dans un circuit enterré pour rafraîchir une demeure : le puits provençal est devenu hors la loi ! Ce dernier n'existant plus en France, il reste le recours à son neveu : le puits canadien. Il s'agit souvent d'un tuyau étanche de 20 cm de diamètre et d'une cinquantaine de mètres de long. Les normes françaises imposent de l'enterrer à plus de 1,20 m de profondeur et de l'alimenter par une prise d'air dépassant de plus de 1 m au-dessus du sol. Il est généralement connecté à une VMC et refroidit l'air d'environ 6 °C en été. On l'enterrera nettement plus profond si l'on souhaite profiter de la chaleur du sol en hiver. Si la canalisation passe à 2 m de profondeur, elle protégera efficacement le bâtiment du gel (elle fournira un air à + 2 °C lorsqu'il fera – 10 °C à l'extérieur). Son efficacité sera considérablement améliorée si l'entrée d'air est protégée par un arbuste dense et persistant (abritée du soleil en été, des froids vifs et du vent en hiver).

Copyright © 2016 Eyrolles.

L'orientation optimale est donnée par les bâtiments anciens de la vallée. La maison moderne à gauche de la photo est perpendiculaire à la bonne orientation.

Sur le talus, la maison ancienne est protégée du vent par la crête d'une colline. Mais les pavillons récents, implantés au beau milieu d'une ravine, souffrent de l'humidité et risquent gros en cas de fortes pluies.

Ces volets anciens révèlent un climat rigoureux en hiver : on peut les ouvrir par un petit volet réalisé à l'intérieur du grand volet pour avoir un peu de lumière tout en conservant une lame d'air relativement tempérée, en haut, entre le volet et la fenêtre.

Ces deux grandes fenêtres ouvertes au nord sont évidemment dues à une rénovation malencontreuse.

3. Apprendre des bâtiments anciens du voisinage

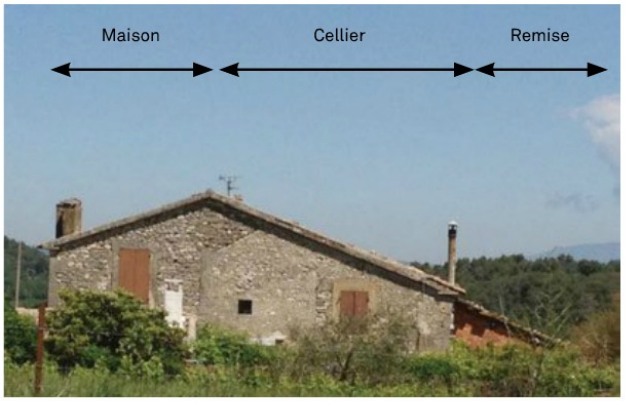
Il est difficile de lister tous les renseignements que l'on pourrait tirer de la visite d'une maison ancienne : épaisseur des murs, angle du plateau des fenêtres, forme des ouvertures, puissance des fondations, teneur en chaux du mortier, hauteur du plafond, dessin des sorties de cheminée, inertie thermique du bâti, génoises pleines ou creuses, etc.

On se méfiera des rénovations trompeuses. Par exemple : les fenêtres récentes sont généralement montées au ciment et non pas à la chaux ; on ne construisait pas de véranda orientée au nord ; avant 1850, n'existaient ni verres de plus d'un mètre de haut, ni aluminium, ni fers à béton.

Zone côtière

Les volumes renseignent d'abord sur l'amplitude thermique du microclimat local. En bord de mer, des bâtiments s'étalent plus longs et plus bas, alors que dans l'arrière-pays on les voit plus hauts. Mais il y a une constante : dans les deux cas, la pièce principale est presque cubique, protégée par

Copyright © 2016 Eyrolles.



Dans les zones côtières, soumises à un vent dominant, les celliers ont souvent été prolongés sur toute la hauteur de la maison. Une remise a permis d'allonger et d'abaisser le toit, pour mieux éviter la tramontane.

les chambres (ou les combles) en haut et par les pièces tampons en est, nord et ouest. Le toit offre le moins de prise possible au vent, ce qui se traduit par un angle d'environ 18° pour des tuiles canal.

Au bord de la côte, on notera la forte épaisseur des dalles et les escaliers maçonnés. Ils renseignent sur le besoin d'inertie thermique (supérieur à un mois) des bâtiments. Les parois assurent un déphasage de douze heures. En cas de rénovation, on repérera la hauteur de plafond. Si elle est basse, le microclimat est sans doute plus froid en hiver que ne le laisse supposer la distance à la mer : on isolera par l'extérieur en visant un déphasage de trente-six heures (option la plus confortable). Si le plafond dépasse les 2,50 m, on optera pour un déphasage de quatorze heures, et si l'endroit est sec, on pourra utiliser des isolants phénoliques poreux (c'est l'option la moins onéreuse) autour des pièces tampons bien aérées. En règle générale, isoler les combles et les fondations s'avère suffisant.

Les lois et les décrets imposent que la construction neuve soit soumise à la réglementation sismique Le bâti étant contraint à l'utilisation de nombreux fers à béton, on se rappellera qu'ils forment d'excellents conducteurs de la chaleur. On l'isolera donc par l'extérieur en étant vigilant à

Ce type de bâtiment se trouve fréquemment dans la campagne. Il s'agit d'un mas, ou plutôt de l'origine d'un mas. Le paysan qui l'a fait édifier n'a sans doute pas connu les bonnes récoltes espérées... il n'a pas pu le finir : les pièces tampons sont encore absentes. Gageons que la rénovation d'un tel bâtiment consistera à le respecter tout en l'adaptant au mode de vie actuel de ses futurs habitants.

ce que la masse thermique protégée par l'isolant corresponde à l'inertie des vieilles maisons de l'endroit. On n'oubliera pas les ventilations sous les combles. On sera vigilant au confort acoustique intérieur : le bureau d'études structure ayant imposé béton et acier, on compensera leur effet en prévoyant autant de bois, de terre ou de tentures que possible à l'intérieur du volume.

S'inspirer du mode constructif des bâtiments anciens ne signifie pas que l'on puisse construire n'importe où. Du point de vue de la seule bioclimatique, les terrains idéaux pour construire en Provence se trouvent en hauteur (au-dessus de l'humidité froide de l'hiver) et orientés au sud (entre sud – 15° et sud + 15°). Si l'on ne souhaite pas qu'un voisin vienne un jour masquer le soleil à la façade sud de la maison que l'on projette, on construira vraisemblablement sur une pente.

Copyright © 2016 Eyrolles.

L'isolation du toit est la plus rentable en Provence, apportant un confort d'été indispensable (surtout si les combles sont ventilés) et conservant la chaleur à l'intérieur en hiver. Mais en cas de rénovation, si l'on souhaite conserver une génoise ancienne, la rehausse de 28 cm de la couverture (12 h de déphasage) est apparente. La gouttière en zinc dénature le style provençal traditionnel, mais est obligatoire.

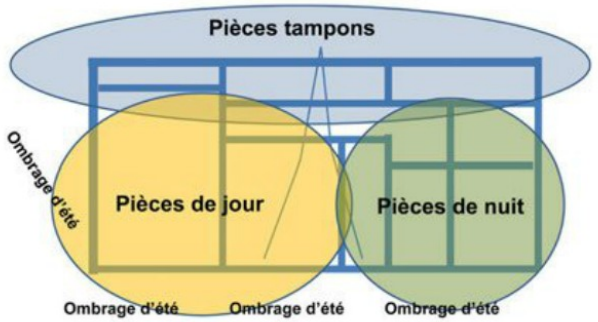
Sur les pentes, les toits des villages de Provence forment un vélum continu d'où ne dépasse qu'un clocher massif. Les clochetons en métal ne s'opposent pas au vent, ils le laissent les traverser. Il ne faut pas envisager de créer un étage supplémentaire en surélevant une maison de village, sous peine de devoir affronter des bourrasques violentes, surtout si le clocheton local, en métal ajouré, indique des rafales violentes.

4. Rénovation de bâtisses

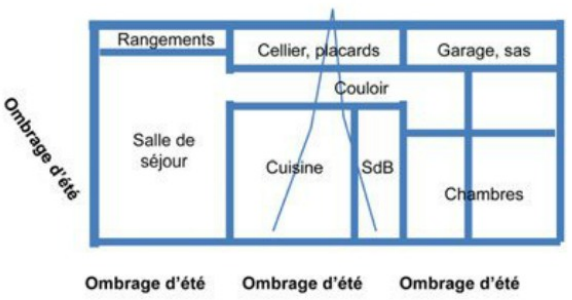
Si l'on repère un vieux bâtiment, en plaine, précédé par une large bande de terrain, on pensera que, puisque les anciens l'ont construit là, l'endroit ne doit pas être si mal choisi. L'est-il toujours ? La platitude des plaines alluviales offre l'avantage de travaux moins onéreux qu'au flanc d'une colline rocheuse. La riche terre arable des bords du Rhône promet des jardins enchanteurs. Un terrain dégagé au sud devrait garantir l'absence de masque solaire conséquent dans l'avenir.

Diagnostic

Le bâtiment est bien orienté vers le sud. Ses parois (et ses pierres d'angle) paraissent en excellent état. Le toit a été abîmé quand il a été abandonné quelques années à la vigne vierge. La charpente, relativement légère, a été fragilisée par deux siècles de mistral, mais les six poutres sont restées saines. Les ouvrants n'ont pas bougé, mais il n'y a aucune huisserie depuis longtemps. Le sol est encore en terre battue. Aucune isolation, bien entendu, ne vient doubler les parois.



Organisation du rez-de-chaussée du mas



Copyright © 2016 Eyrolles.

Les villages étaient édifiés en bandes successives, au sud. Quand la pente le permettait, chaque nouvelle maison devait laisser le soleil d'hiver accéder aux fenêtres de la rangée en amont. En bas à droite, on voit la première maison d'une prochaine bande de bâtiments.

Objectif

Conserver cette grande masse thermique en édifiant autour les pièces tampons (sauf au sud), les isoler par l'extérieur. Profiter de la beauté de ces murs de pierre dans la décoration intérieure de l'ensemble bâti obtenu.

Les pièces tampons sont placées autour du bâtiment à rénover, sauf au sud. Celles au nord assurent un complément d'isolation et nécessitent peu d'éclairage. Au rez-de-chaussée, l'organisation des pièces tampons se divise en trois zones, chacune ayant une température cible différente. Les sources de chaleur importantes (moteur du réfrigérateur et du congélateur, fours, arrivée d'eau chaude) donnent sur le mur de la salle de bain. La paroi ouest, celle de la salle de séjour, sera conçue en « double peau » afin de protéger le bâti de l'irradiation solaire. Les ombrages d'été font partie intégrante du projet (ici, des végétaux : arbres caducs et vigne vierge).

Choix d'un terrain

Du point de vue de la seule bioclimatique, les terrains idéaux pour construire en Provence se trouvent en hauteur (au-dessus de l'humidité froide de l'hiver) et orientés au sud (entre sud –15° et sud +15°). Si l'on ne souhaite pas qu'un voisin vienne un jour masquer le soleil à la façade sud de la maison que l'on projette, on construira vraisemblablement sur une pente.
La plupart des terrains plats, en Provence, ont été aplanis par l'eau. Il s'agit soit des bords d'un cours d'eau (zone potentiellement inondable), soit d'un ancien marais asséché (terres qui amplifient les ondes sismiques), soit d'une zone qui a été inondée au cours des siècles. Il faut se méfier de tout terrain plat en raison de l'éventuelle insécurité qu'il présente.

Deux maisons voisines : l'une sur la colline, l'autre dans sa pente

C'était une petite maison, logée dans la frondaison des chênes verts, au haut d'une colline du Luberon. Ses pierres ridées par les intempéries révélaient un âge avancé. Des murs on ne voyait que la roche. Entre beige et gris, sa teinte changeait avec l'heure du soleil. Vue de loin, l'habitation se confondait avec le rocher ombré de feuillage sombre. Construite avec les matériaux qui l'entouraient, elle était comme camouflée. Mimétique, elle appartenait au paysage. Seuls les volets, d'un bleu soutenu, signalaient la maison. Ils paraissaient suspendus dans la verdure de la forêt. Quelques taches de couleur qui annonçaient, de loin, que l'endroit était habité. L'œil attiré par ces rectangles détonants, on commençait à discerner les volumes. Entre les taches d'ombre projetées par les chênes verts, on devinait quelques traits rectilignes : les bords des murs, le départ du toit, dessinaient une maison trapue.

Copyright © 2016 Eyrolles.

À peine plus bas, dans la pente du vallon, se dressait une autre habitation de même facture. On avait dû utiliser les mêmes pots pour peindre le bleu des volets. Les pierres venaient aussi du rocher sur lequel elle était construite. La terre sous le préau ne différait pas de celle qu'on voyait sous les oliviers voisins. Autour s'étiraient des bancaous. Cette maison-ci était bien visible, une vigne striait un champ jusqu'à son pied. Deux étages s'élevaient au-dessus de son rez-de-chaussée, ça lui donnait un air de petite tour. En haut des murs, une large génoise soulignait le bord du toit d'un grand trait d'ombre. Une vigne vierge épaisse couvrait la façade tout l'été, du côté du midi. La face nord restait presque aveugle : deux toutes petites fenêtres y étaient encastrées, même pas symétriques. L'ombre y révélait un mur épais, pesant.

À moins de cent mètres de distance, une construction était trapue, l'autre était tout en hauteur. Deux maisons si proches construites à la même époque : pourquoi les anciens leur avaient-ils conféré deux silhouettes si distinctes ?

Toutes deux reposaient sur de lourds murs de soixante centimètres d'épaisseur. Entre les pierres empilées, il y avait un peu de terre ramassée à côté du chantier. Elle avait été battue avec de la chaux. Ce mélange permettait d'éviter que l'air ne se glisse à travers le mur et il figeait les cailloux qui calaient les pierres des parois. Cet empilement minéral formait une masse thermique puissante. Le soleil d'été pouvait chauffer la façade tant qu'il le voulait. Le temps que la canicule de midi traverse ce mélange minéral, il était près de minuit.

Les deux maisons utilisaient le même principe thermique : le déphasage. La température extérieure du mur se transmettait jusqu'à l'intérieur du mur en une douzaine d'heures. Les jours d'hiver, il peut faire froid dans le Luberon. Il gèle durant plusieurs semaines, chaque année. Il faut donc que les grandes façades puissent capter un maximum de chaleur. C'est ce qu'elles font. Sans même d'enduit qui les protégerait, les pierres reçoivent tous les rayons du soleil bas d'hiver. A priori, la maison en forme de tour était donc la mieux adaptée au climat. Des deux, elle offrait la plus grande surface de façade au soleil d'hiver et la plus petite surface de toit. Sa triple rangée de génoises dépassait de près de cinquante centimètres par rapport au mur, elle le protégeait des rayons les plus chauds de l'été.

Pourquoi avoir construit une maison trapue ? Les chênes verts ne s'élèvent jamais très haut. Le haut de la colline n'était pas protégé du vent par un relief. Il pouvait souffler fort au-dessus de la végétation. Les anciens avaient donc opté pour des murs bas. Le toit, presque plat, dépassait à peine la cime des arbres. La façade nord restait protégée du mistral par la forêt. Les deux rangées de génoises, courtes, offraient peu de prise. Elles risquaient donc moins d'être arrachées. Moins de débord, donc moins d'ombre portée, suffisait pour protéger des murs moins hauts. Au haut de la pente, l'humidité restait rare.

Les silhouettes de ces maisons de village étonnamment trapues révèlent des plafonds intérieurs bas. Ce type de construction indique des hivers particulièrement rigoureux.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Pour le même volume, la maison trapue présentait la plus grande surface de toit à la chaleur du soleil d'été. Aussi, le mestre avait particulièrement soigné l'isolation thermique des combles. Au-dessus des poutres épaisses, deux couches de pare-feuilles entrecroisées étaient grossièrement liées au plâtre. Le froid des nuits d'hiver pouvait être amplifié par le mistral. La chaleur des rayons du soleil d'été pouvait s'accumuler sous les tuiles. La masse thermique, au plancher des combles, permettait, là encore, de différer l'impact thermique d'une dizaine d'heures. Cette solution n'était idéale qu'à la condition que la chaleur de la canicule estivale ne s'accumule pas trop dans les pare-feuilles. Les chambres étant à l'étage, on souhaitait dormir au chaud en hiver, mais certainement pas en été. Alors, les anciens avaient fait percer deux ouvertures sur le pignon ouest et deux autres, en vis-à-vis, sur le pignon est. Dès novembre, on les fermait. En mars, on les ouvrait. Donc, lorsque le soleil tapait fort sur le toit, un léger courant d'air balayait les combles de la chaleur qui s'y serait accumulée. De ce fait, les pare-feuilles restaient frais tout l'été.

Les anciens adaptaient leurs constructions au climat local, au microclimat !

Copyright © 2016 Eyrolles.

ANNEXE 3 : LE CLIMAT DU MARQUISAT DE PROVENCE

La France jouit du climat tempéré propre à l'Europe de l'Ouest. Aucune montagne haute ne vient arrêter l'influence des températures modérées de l'Atlantique ou de la Méditerranée. Au sud (« le Midi »), à l'est de la vallée du Rhône, s'étend une région connue pour ses climats accueillants : la Provence. L'influence des vents marins venus de la Méditerranée se limite à quelques dizaines de kilomètres à l'intérieur des terres. Pourtant, par habitude sans doute, on lui associe généralement un climat méditerranéen.

1. Le climat méditerranéen

Nulle part au monde, nulle part ailleurs qu'autour de la mer Méditerranée, on ne trouve de climat caractérisé par l'alternance d'une saison fraîche et humide et d'une saison chaude et sèche.

Les pluies

Le volume des pluies augmente à mesure que l'on se dirige vers l'ouest et, naturellement, plus on monte en altitude : Marseille (alt. : 0 m) : 560 mm ; Plan d'Aups (alt. : 750 m) : 930 mm ; Mourre d'Agnis (alt. : 911 m) : 1 150 mm.

Bon an, mal an, sur la côte méditerranéenne, les trois quarts des précipitations tombent entre la mi-octobre et la mi-avril. Chaque Phocéen vous le dira : il pleut plus à Marseille qu'à Paris et, en plus, le soleil y brille bien plus souvent ! Les orages, s'ils dépassent rarement quarante-cinq épisodes par an, atteignent parfois des violences extrêmes : le 18 novembre 1932, il tomba 21,2 cm d'eau sur Marseille ; le 12 novembre 1941, des trombes d'eau déversèrent 17,55 cm d'eau en moins de deux heures sur Toulon ; le record semble encore détenu par Marseille avec 9,65 cm d'eau en vingt-cinq minutes.

À l'intérieur des terres, les pluies se concentrent en automne (d'octobre à décembre), mais il pleut aussi entre mars et mai. Entre ces deux périodes : une courte saison sèche d'hiver et une longue période sèche et brûlante en été. La période sèche correspond à celle du mistral, lorsque les vallées des Alpes suisses affichent des températures nettement plus fraîches que la surface de la mer Méditerranée. Autrement dit (en langage météo moderne), « de hautes pressions issues du puissant anticyclone situé sur l'Europe centrale poussent vers le sud un air froid, sec et stable qui repousse vers l'extrême sud l'air humide et relativement doux (cyclonal). »

Les températures

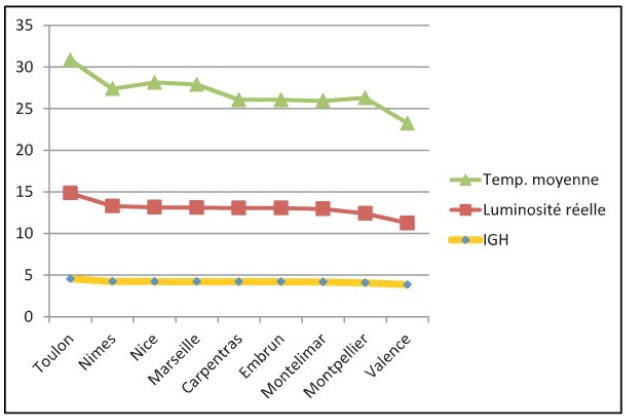
Les températures moyennes sont douces, mais les moyennes masquent des températures aux irrégularités fréquentes et accentuées. La seule saison dont la température reste régulière est l'été. En effet, l'air méditerranéen (bord de mer), relativement sec, est « diathermane », c'est-à-dire qu'il transporte relativement peu de thermies. Au contraire, l'air de l'arrière-pays est plus humide, donc plus lourd, et porte plus de thermies (ou de frigories). Aussi, le nombre de nuits où il gèle est nettement plus important à mesure que l'on s'éloigne de la mer. En moyenne, sur cinquante ans, il a gelé trois nuits par an à Toulon contre soixante-treize nuits à Brignoles.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Les vents

Le mistral est un vent sec qui a des cousins proches : la tramontane en Languedoc, le cers en Roussillon…

Sous le climat méditerranéen, les particularités climatiques régionales sont courantes. Zoomons encore un peu, considérons les caractéristiques climatiques de l'une de ces régions : la Provence.



L'IGH représente l'irradiation réelle, c'est-à-dire l'irradiation solaire corrigée de tous les phénomènes météo (nuages, brumes, poussières…). La valeur de l'IGH de Toulon est de 4,57, celle de Paris de 3,06.

2. La Provence

Jean Picquet (1621) définissait la « Doulce Province » par l'ensemble des terres comprises entre le Rhône et les contreforts des Alpes, entre Valence et la mer Méditerranée.

Aujourd'hui, la région Paca est plus grande, puisqu'elle s'étend jusqu'aux Hautes-Alpes, mais s'arrête (au nord) à la Drôme. Autrement dit, cette division purement administrative résulte de l'histoire : elle englobe les terres du comté de Provence (sud de la Durance) et celles du marquisat de Provence. Ces dernières étant limitées à l'ouest par le Rhône, à l'est par les Préalpes, au sud par la Durance et au nord par le Diois (Valence).

Historiquement, le comté dépendait du marquis de Catalogne, tandis que les terres du marquisat appartenaient au comte de Toulouse (traité du 16 septembre 1625) et furent ensuite nommées « arrière-pays provençal ».

Le climat de la Provence

Il est caractérisé par l'influence de la douceur due à la masse thermique de la mer Méditerranée. Le Mistral domine dans la vallée du Rhône, il souffle un jour sur trois. Les cieux y sont clairs presque 300 jours sur 365. Les pluies s'y concentrent en orages quarante-cinq fois par an, en moyenne. Les hivers y sont réputés doux et les étés caniculaires. La Provence s'assèche depuis Mazarin (XVII^{e} s.), depuis qu'elle a perdu son immense forêt.

C'est un climat fort, puissant. Il reste qu'il est souvent plus agréable de s'adapter à la violence de l'irradiation solaire qu'à son absence.

Exemple d'un sous-climat régional

La région Paca est trop vaste pour qu'on puisse en lister tous les microclimats locaux. Les Alpes et la Côte d'Azur ne sont évidemment pas baignés par les mêmes cieux. Même si nous nous limitions à une zone climatique, nous verrions que les variations sont nombreuses. Montélimar ne connaît pas les vents légers levés en fin d'après-midi par la brise de mer du golfe du Lavandou. Marseille et Arles, si proches, ne vivent pas dans les mêmes masses thermiques. Carpentras et Sault, à peine séparées par le Ventoux, connaissent des courbes de températures très différentes.

Zoomons encore un peu et considérons une sous-région relativement homogène : le marquisat de Provence. On verra qu'elle est encore composée d'une multitude de climats juxtaposés, qui présentent des variations significatives. Lesquelles ?

Copyright © 2016 Eyrolles.

Mois	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.		Année
Température moy. de l'air	**9**	**9**	**14**	**17**	**21**	**26**	**29**	**26**	**24**	**20**	**14**	**10**		**18**
Températures min. moyennes	6	5	7	11	12	17	18	17	16	14	10	5		11,6
Températures max. moyennes	12	13	18	21	23	29	29	29	27	23	17	12		21
Nb d'heures où temp. > 18 °C	0	0	6	25	48	325	430	442	192	113	2	0	DJU Climaticien	1581
Moyenne des précipitations (mm)	121	82	34	20	14	75	36	24	141	48	**211**	42		848
Précipitations max. en 24 h	47	21	17	5	5	26	23	7	86	40	59	23		86,4
Précipitations max. en 5 jours	82	38	17	11	9	34	26	15	101	44	114	35		113,6
Nîmes-Garons														
Température moy. de l'air	8	9	13	16	20	25	27	27	22	18	13	9		17
Provenance du vent	NNE	NNE	NNE	N	NNE	NNO	NNO	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	Mistral très dominant	
Vitesse moy. du vent (Beaufort, kts)	10	10	10	10	10	9	9	9	9	9	9	9		
Vitesse moy. du vent (km/h)	19	19	19	19	19	17	17	17	17	17	17	17		18
Nîmes-Courbessac														
Températures moy. de l'air	9	9	14	17	21	26	29	26	23	21	14	10		18
Provenance du vent	N	N	N	N	N	NNE	NNE	NNO	NNE	SSE	NNO	N	Vent d'Ardèche	
Vitesse moy. du vent (Beaufort, kts)	6	7	7	8	9	7	9	9	7	7	6	7		
Vitesse moy. du vent (km/h)	11	13	13	15	17	13	17	17	13	13	11	13		14

Relevés météorologiques aux deux stations de Nîmes, moyennes mensuelles 2014. Une dizaine de kilomètres séparent Garons de Courbessac (aéroport de Nîmes) et pourtant la carte des vents est bien différente : à Garons, le vent dominant est fort, frais et sec (mistral) ; à Courbessac, le vent dominant, frais, plus lent et plus humide, vient d'Ardèche.

Moyennes annuelles de l'énergie reçue sur une surface orientée plein sud et inclinée d'un angle égal à la latitude.

3. La « douceur méditerranéenne »

Au sud de la vallée du Rhône, la mer est chaude, alors qu'au nord, aux environs du lac Léman, le froid descend des Alpes, balayé par un vent d'est. La masse d'air se dirige du froid vers le chaud, du nord vers le sud. Au niveau de Valence apparaît un rétrécissement entre deux massifs montagneux : les Préalpes et le Massif central. Le flux s'accélère. Le mistral (le magistral) se forme. On dit qu'il répond à la règle des 3-6-9 : il dure soit trois, soit six, soit neuf jours. À Orange, Avignon ou Arles, comme au pied du Ventoux, il représente une composante majeure du confort de vie des habitants. Les végétaux composent aussi avec son influence. C'est qu'il peut se montrer violent. Ses rafales déboulent parfois dans la vallée à plus de 120 km/h (en décembre). Il souffle surtout d'avril à juillet, et agite les frondaisons du marquisat de Provence 120 à 160 jours par an. Les capteurs météorologiques calculent sa vitesse moyenne : 90 km/h. Dans la vallée du Rhône, il souffle du nord alors que le Luberon le voit s'engouffrer par l'ouest.

À plus haute altitude, la proximité de l'air marin a néanmoins tendance à atténuer les pics de température que subirait le marquisat de Provence. C'est que le Massif central et son prolongement cévenol, en l'isolant de la prime influence océanique atlantique, auraient tendance à lui conférer un climat continental. La distance de chaque village à la vallée du Rhône détermine donc et son humidité et sa fraîcheur hivernale. Ceux qui se trouvent isolés des montées d'air méditerranéen, par la barrière nord-sud du mont Ventoux, connaissent donc des climats relativement plus continentaux (Sault, Saint-Christol).

4. Les cieux clairs

C'est d'abord l'ensoleillement qui attire le touriste étranger ; les départements du Vaucluse et du Var sont les plus ensoleillés de France (2 700 à 2 900 heures par an). La luminosité des cieux de Provence est proverbiale. L'indice IGH décrit l'énergie lumineuse réellement reçue sur Terre, prenant en compte tous les phénomènes météorologiques (brumes, poussières). Le marquisat de Provence en détient les records en France, année après année.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Ensoleillement maximal

La région Provence – Alpes – Côte d'Azur est sans conteste la plus ensoleillée de France. Le quinté des départements les plus ensoleillés en fait intégralement parti : Bouches-du-Rhône, Alpes-Maritimes, Vaucluse, Alpes-de-Haute-Provence, Var. En y regardant de plus près, on notera que les 60 villes les plus ensoleillées de France se trouvent à moins de 50 km du Rhône et sont toutes à l'est de ce fleuve. Elles se situent dans un rayon de 30 km autour d'Aix-en-Provence. Encore plus précisément, les 47 villes les plus ensoleillées de France se trouvent toutes dans les Alpes-Maritimes.

Son IGH moyen culmine à 4,21. La luminosité est encore accrue par la végétation basse et la terre pierreuse : l'albédo moyen s'avère particulièrement important. Sous cette forte charge radiative, les arbres qui prolifèrent naturellement, aujourd'hui, sont les chênes verts de la garrigue. Leurs feuilles présentent une face cirée aux rayons solaires, tout comme la vigne vierge. Ils ont tendance à réfléchir la lumière.

Les cieux clairs imposent un autre corollaire : les nuits, sans nuage, sont fraîches. Il en résulte une particularité fondamentale mais trop souvent négligée : la différence de température entre la nuit et le jour (amplitude quotidienne) est particulièrement élevée. Globalement, l'heure la plus chaude du jour dépasse de 16 °C l'heure la plus froide de la nuit en été. Ce chiffre descend à 14 °C en hiver. À part l'Alsace (climat précontinental), il n'y a pas de région en France qui affiche d'aussi grandes amplitudes thermiques sur vingt-quatre heures.

5. Les pluies concentrées en orage

Les vieux paysans provençaux disent que c'est la rosée qui arrose et que ce sont les pluies qui lavent. Les gens de la terre savent de quoi ils parlent. Les orages apportent de l'eau en abondance ; il pleut en moyenne 900 à 1 000 mm d'eau par an, essentiellement sur les reliefs.

Cette concentration des intempéries est particulièrement marquée dans le marquisat de Provence. Des précipitations de 100 mm en vingt-quatre heures ne sont même pas rares (pour comparaison : à Caen, les précipitations moyennes du mois le plus pluvieux de l'année n'atteignent que 77 mm). Heureusement, nos avancées technologiques et des investissements importants ont

Mois	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.		Année
Température moy. de l'air	9,3	9,8	11,4	13,7	17,1	20,8	23,9	23,8	21,2	17,3	12,8	10,2		15,9
Températures min. moyennes	5,8	6,2	7,5	9,6	12,7	16,1	18,8	18,7	16,6	13,3	9,2	6,7		11,8
Température min. record (depuis 1970)	*-7,2*	*-7,5*	*-4,3*	*2,4*	*7*	*9*	*12,8*	*12,3*	*8,4*	*4,8*	*0,7*	*-2,8*	*en 1986*	*-7,5*
Températures max. moyennes	12,7	13,3	15,3	17,8	21,6	25,6	29,1	28,9	25,7	21,4	16,3	13,6		20,1
Température max. record (depuis 1970)	*20,2*	*22,5*	*22,8*	*25,8*	*30,4*	*34,5*	*40,1*	*37*	*34,7*	*29,3*	*24,2*	*21,9*	*en 1982*	*40,1*
Vitesse du vent (en km/h)	30	30	52	30	30	13	2	2	30	30	41	41	moyenne	28
Nb de jours avec vent > 58 km/h	12,5	9,8	11,7	11,4	8,6	8,4	7,3	9	7	10,7	9,8	9,3		115,5
Nb de jours avec vent > 100 km/h	2,1	1,1	0,7	0,5	0,2	0	0,1	0,2	0	0,9	0,8	1,3		7,9
Vitesse record du vent (depuis 1970)	*130*	*137*	*133*	*108*	*108*	*97*	*122*	*126*	*64*	*115*	*148*	*115*	*en 1983*	*148*
Moyenne des précipitations (mm)	76,3	88,3	56,4	55,7	45	22,3	6,6	28,5	49,1	93,9	69,4	73,5	cumul annuel	665
Nb de jours avec précipitations > 10 mm	2,7	2,9	1,9	1,7	1,5	0,6	0,2	0,8	1,3	2,7	2,1	2,4	nb jours d'orage	23,7

Relevés météorologiques à Toulon, moyennes mensuelles 2014. Les températures moyennes sont prises en compte pour calculer les besoins en chauffage ou les risques de surchauffe dans le logis. D'octobre à mars, ce sont le vent et la pluie qui conditionnent le confort des habitants.

Copyright © 2016 Eyrolles.

permis de contrôler les deux principaux cours d'eau. La Durance n'arrache plus de villages lors de ses crues, et le Rhône a été tellement truffé d'écluses et de barrages que ses débordements sont devenus rarissimes. Reste que, année après année, les précipitations annuelles dans le marquisat provençal sont supérieures à celles du pays d'Auge ou de l'Orne (Normandie).

Du fait d'une humidité ambiante plutôt élevée, et de la forte amplitude thermique quotidienne, la rosée s'avère particulièrement abondante et presque systématique.

Puisque les cieux restent dégagés environ trois cents jours par an et que le mistral est un vent sec (les Provençaux le surnomment « mango fango » : le « mange-boue »), les terres restent sèches, voire arides, l'essentiel de l'année. Arrive un orage et l'eau déboule en surface. Elle ravine les coteaux et les chemins, elle dégage les cailloux de leurs gangues de terre, jusqu'à glisser, sans la moindre infiltration, sur les surfaces goudronnées où elle s'accélère. Les niveaux des rivières montent vite. Il y a parfois danger. Les précipitations se concentrent sur deux saisons. L'automne apporte plus d'eau que le printemps.

Pluies et vents sur le Gard

Le Gard fait toujours partie des 10 départements les plus arrosés de France : selon les années, son rang dans ce classement change, mais la pluviométrie y est toujours abondante. En 2014, c'était le 5e département le plus arrosé de France (avec 1 275 mm d'eau annuel) derrière l'Ardèche, les Pyrénées-Atlantiques, les Hautes-Pyrénées et le Finistère, les records de pluie en hiver se situant généralement dans le Pays basque.

En ce qui concerne le vent, le Gard est généralement le département qui connaît les vitesses maximales de vent les plus élevées. Année après année, il domine le podium des départements les plus venteux, toujours suivi de l'Hérault, de la Lozère et de l'Aveyron.

Géographiquement, le Gard s'étend entre les Cévennes et le Rhône et, de fait, ses villes cévenoles sont extrêmement arrosées, alors que ses villes rhodaniennes sont particulièrement venteuses. Les 100 villes de France les plus arrosées par les pluies se trouvent sur les flancs est et sud des Cévennes (qu'elles appartiennent à l'Hérault, à la Lozère, à l'Aveyron ou – surtout – au Gard). C'est aussi là que se trouvent les villes les plus venteuses (nombre de jours où le vent dépasse 40 km/h). Ainsi, s'il existait un petit département couvrant l'est et le sud des Cévennes, il serait à la fois le plus pluvieux et le plus venteux de France, tout en faisant partie des 10 ou 15 départements les plus ensoleillés !

Dans cette région, le vent, fréquent, chasse les nuages, libérant un ciel bleu jusqu'à ce qu'un épisode orageux s'abatte. Alors, les vannes du ciel s'ouvrent et l'eau qui s'en déverse lave, dévale, inonde, arrache, emporte tout avec une violence dévastatrice.

Mois	jan.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.		Année
Températures min. moyennes	2	3	6	8	12	15	18	18	14	11	6	3	moyenne	9,6
Températures moyennes	6	7,5	11	13	17,5	21	24	24	19,5	15,5	8,5	7,5	moyenne	14,7
Températures max. moyennes	10	12	16	18	23	27	30	30	25	20	13	10	moyenne	19,75
Amplitudes thermiques moyennes	14	13	14	14	16	16	17	17	15	14	14	13	moyenne	14,75
Précipitations (mm)	36,5	23,3	24,9	47,5	45,6	25,4	20,9	29,1	65,8	59,6	52,8	34	cumul	465,4

Relevés météorologiques d'Avignon, moyennes mensuelles. Températures moyennes d'été : 30 °C le jour / Températures moyennes d'hiver : 5 °C, le jour. 2 800 heures de soleil/an. Ce type d'information est consultable sur les sites des mairies de la plupart des villages de Provence.

Copyright © 2016 Eyrolles.

6. Les hivers réputés doux

Les étés caniculaires s'opposent aux hivers cléments. Les températures moyennes des jours les plus froids étant 30 °C plus fraîches que celles des jours les plus chauds de l'année. Cet écart très important rappelle le climat des régions montagneuses ou continentales. La différence entre le minimum moyen du mois le plus froid (janvier) et le maximum du mois le plus chaud atteint 38 °C à Bonnieux et 42 °C à Pertuis. Si l'on considère les températures moyennes mensuelles, alors les différences se rapprochent plutôt d'une bonne quinzaine de degrés Celsius.

Mais les moyennes sont trompeuses. Les villages proches de la Durance reçoivent chaque hiver l'air froid des Alpes qui descend le long du cours de la rivière. Dans certaines zones humides, les thermomètres flirtent avec les – 25 °C tous les ans, alors qu'à dix kilomètres de là, on atteint rarement les – 8 °C. Le mont Ventoux (1 912 m) a des influences distinctes sur les bourgades qui le ceignent. Le plateau de Sault connaît une neige abondante tous les ans, ce qui n'est pas le cas de la région de Carpentras (distante d'une vingtaine de kilomètres). Les vieux villages s'installaient en haut des dénivelés, ils se protégeaient de l'humidité et s'épargnaient le froid glacial en hiver. Ils préféraient affronter le mistral en construisant des maisons lourdes dont les toits leur faisaient une sorte de carapace.

Si les hivers ne sont pas toujours doux, leurs épisodes extrêmes ne durent pas plus de 10,8 jours. De même, les périodes caniculaires d'été ne dépassent pas 10,4 jours (moyennes sur cinquante ans).

7. L'amplitude thermique

Les nuits sont toujours plus fraîches que les jours. En Provence, ces écarts de températures sont particulièrement puissants : le réchauffement quotidien dépasse les 14 °C !

Le climat du marquisat est aussi caractérisé par de brèves périodes (quelques semaines) de canicule ou de froidure.

Les nuances ne manquent pas. Les microclimats du marquisat provençal sont variés. Les habitants qui vivent en haut d'un éperon rocheux ne connaissent pas la même humidité que ceux qui ont choisi la vallée en contrebas. Les maisons qui bordent son axe nord-sud connaissent des hivers plus doux que celles qui avoisinent l'axe est-ouest de la Durance. Pour certains, le mistral souffle du nord et, pour d'autres, de l'ouest. Mais tous les habitants du marquisat provençal profitent des mêmes cieux clairs. Tous suffoquent en été et frissonnent en hiver. Tous ont nettement plus froid la nuit que le jour.

C'est ce que reflète le style des maisons de cette région. Les Provençaux souhaitaient vivre le mieux possible. Ils ne disposaient pas de la fabuleuse puissance des énergies fossiles, donc ils ont développé des stratégies constructives différentes des nôtres. La plupart se trouvent contenues dans un

Cette photo a été prise depuis le village de Gordes, un matin d'automne (fin octobre). Tous les bâtiments de la vallée (du Luberon) se trouvent dans la brume humide, sous le nuage. Pendant ce temps, le village de Gordes, installé au flanc d'un mont, reste au sec et se chauffe au soleil.

Copyright © 2016 Eyrolles.

ensemble de connaissances empiriques que l'on appelle « la bioclimatique ». Les mestres du marquisat de Provence nous fournissent un exemple parfait de l'adaptation des hommes au climat qui les baigne.

L'inversion de température

Les villages ancestraux s'accrochaient aux collines, perchés juste au-dessus des plaines agricoles. Plus on se rapproche de la Méditerranée, plus ils se trouvent bas dans la pente. Quel argument justifiait d'endurer à chaque fois la grande peine qu'il y avait à monter en de tels lieux, surtout lorsque la sente était raide et pierreuse ?

On profitait d'un phénomène météorologique local : les inversions thermiques !

Normalement, dans une région accidentée, la température diminue à mesure que l'on s'élève en altitude (de 0,5 °C pour chaque 100 m de dénivelé). Or il arrive que cette variation thermométrique s'inverse et que les couches d'air inférieures soient plus froides que les couches supérieures. Pour que ce phénomène se produise, il faut que le refroidissement nocturne soit particulièrement rapide et que les couches d'air ne soient pas agitées par du vent. C'est fréquemment le cas dans l'arrière-pays provençal, en hiver, lorsque le ciel est découvert. L'inversion thermique s'accompagne d'une différence d'hygrométrie importante. L'air froid et humide colle à la surface humide (cours d'eau ou verdure) en fond de vallon, alors que l'air chaud, plus léger, se glisse au-dessus. L'air froid et humide se condensant plus, une très forte rosée se dépose sur les champs. L'air chaud, au-dessus, baigne les villages perchés. Alors que les pentes sont illuminées dès le lever du soleil, les fonds baignent pendant plusieurs heures dans un brouillard dense, qui ne se dissipe que lentement. La différence de température entre le creux de vallon et le village situé quarante mètres plus haut peut atteindre 9 °C (à Buy-les-Baronnies). Pour exagérer le trait : au plus froid de l'hiver, les champs sont bien arrosés et les habitants vivent au chaud : deux microclimats distincts, distants de seulement cinquante mètres d'altitude.

À noter

L'exemple extrême de l'inversion thermique n'est pas provençal. Le 26 décembre 1879, on a relevé à 6 h du matin – 15,8 °C à Clermont-Ferrand et + 4,4 °C au sommet du puy de Dôme, à 1 465 m d'altitude. Une différence de + 20,2 °C, là où la différence d'altitude aurait justifié – 5,5 °C !

On comprend qu'en région méditerranéenne, l'exposition soit encore plus importante qu'en montagne. Le paysan provençal connaissait son climat local : il privilégiait les fonds de vallée parce que la rosée y arrosait plus ses cultures, et il y freinait le vent pour ne pas que la bonne terre soit asséchée ou emportée par le Mistral. Il préférait vivre accroché à la pente, ses fenêtres tournées vers l'irradiation du soleil d'hiver, et son village tournait le dos au mistral pour qu'il glisse sur ses toits presque plats. Il privilégiait l'humidité pour ses cultures et la chaleur d'hiver pour sa maison.

Les Ligures et les Voconces, nos ancêtres, faisaient déjà de même.

Au XVI^e siècle, la charrette commença à supplanter l'âne comme moyen de transport de marchandises : les villages perchés isolés, ceux qui vivaient pratiquement en autarcie, commencèrent à se vider (la population se plaignant des « inconvénients graves et multiples qui arrivent aux personnes qui habitent le castrum ») et les habitants à se diriger vers la bourgade la plus proche. Les propriétaires terriens construisirent leur mas au plus près des champs. Ils coupaient leur bois de chauffage sur place ou se le faisaient livrer en charrette.

Copyright © 2016 Eyrolles.

Dès la fin du XIXe siècle, dès que les moyens de transport se sont mécanisés et que les emplois se sont concentrés en ville, on a assisté à une migration des populations vers les plaines. Les villes portuaires virent leurs grands bourgeois sortir « de la lourde puanteur estivale » et édifier leur bastide à proximité, en pleine campagne (Boulainvilliers parle de 20 000 « maisons de plaisance » sur le territoire avoisinant Marseille, à la fin du XVIIIe siècle).

Les zones climatiques (« le climat méditerranéen ») dessinent les grandes tendances (style méditerranéen). Puis les sous-régions (Paca) définissent des contraintes climatiques assez caractéristiques pour que les parades constructives deviennent similaires. Puis des sous-sous-régions (Provence) affichent des détails architecturaux distinctifs (« style provençal »). En zoomant encore un peu plus, on distingue parfaitement les types de bâtiments du bord de mer de ceux de l'arrière-pays (marquisat de Provence). En affinant encore, des adaptations particulières des logements ou de leurs alentours reflètent l'adaptation du bâti à des nuances climatiques, par exemple aux pluies plus ou moins abondantes. Encore un peu plus précisément : vallée après vallée, la forme des villages ou des fermes indique la provenance du vent dominant. Les bâtiments anciens montrent, par une profusion de détails, la grande diversité des contraintes climatiques. La bioclimatique est affaire d'adaptabilité aux microclimats locaux.

À noter

Dans la région niçoise, le vent dominant vient du sud-sud-est, c'est un vent humide qui amène la tempête. Pourtant, les villages niçois regardent vers le sud. La quête du soleil primait donc. On se protégeait du vent et de la pluie par d'autres artifices (volets pleins, murets, canisses).

Exemple de maison bioclimatique

Une maison passive de 180 m² dont toute la génération de chauffage est limitée à un sèche-serviette électrique dans chaque salle d'eau. Le soleil apporte toute l'énergie nécessaire pour que :

- en été, l'eau du bassin soit à 25 °C, les chambres à 21 °C et la pièce à vivre à 23 °C ;
- en hiver, l'eau du bassin soit à 25 °C, les chambres à 19 °C et la pièce à vivre à 21 °C.

C'est la structure béton-acier qui assure le rôle de diffuseur de chauffage. Tous les ponts thermiques chauffent des pièces tampons, sauf ceux en sud qui (positifs) sont utilisés pour conduire le chauffage (irradiation, puis conduction) à l'intérieur des pièces à vivre. Quatre panneaux solaires thermiques assurent l'intégralité des besoins en eau chaude. La ventilation naturelle permet d'évacuer 2 à 6 vol./heure, selon les pièces, durant la saison chaude. Lorsqu'il fait froid, le renouvellement d'air est confié à deux ventilations hygro B avec récupérateur de chaleur (stabilisant l'humidité à 50 %). Chaque pièce reçoit un éclairage naturel. Toutes les surfaces habitables sont structurellement protégées du souffle direct du mistral. L'eau de la maison sert deux fois et provient essentiellement des toits. Celle nécessaire aux jardins est apportée par le ruissellement en cas d'orage, les toits et l'évacuation du broyeur de la paillasse à rincer de la cuisine (pour le potager). Lorsqu'il n'est pas utilisé, le bassin est couvert pour en limiter l'évaporation. En été, dans le jardin haut (bancaou), le taux d'humidité est élevé par la concentration d'air frais au ras du sol, au plus froid de la nuit, ce qui multiplie la condensation de la rosée (jardin humide).

Copyright © 2016 Eyrolles.

Chez le même éditeur

Sous la direction de Bruno Peuportier, *Énergétique des bâtiments et simulation thermique. Modèles, mise en œuvre, études de cas,* 448 p., 2016

Yves Benoit, *Maison à ossature bois et développement durable. Conception, construction et exploitation,* 224 p., 2016

Alain Triboix et Jean-Baptiste Bouvenot, *Les transferts thermiques par l'exemple. Conduction, convection, rayonnement, échanges de chaleur, méthodes numériques. 71 problèmes d'application résolus ; méthodes et formulaires,* 496 p., 2015

Richard Franck, Guy Jover et Frank Hovorka, *L'efficacité énergétique du bâtiment. Optimiser les performances énergétiques, le confort et la valeur des bâtiments tertiaires et industriels,* 532 p., 2014

Jean-Claude Scherrer, *Le guide de l'étanchéité à l'air,* 152 p., 2013

Dominique Pajani, *La thermographie du bâtiment. Principes et applications du diagnostic thermographique,* 216 p., 2012

Alain Garnier, *Le bâtiment à énergie positive. Comment maîtriser l'énergie dans l'habitat ?,* 296 p. 2011

Louis-Paul Hayoun et Aurian Arrigoni, *Les installations photovoltaïques. Conception et dimensionnement des installations raccordées au réseau,* 232 p., 2010

Armand Dutreix, *Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments,* 240 p., 2010

Catherine Charlot-Valdieu et Philippe Outrequin, *Écoquartier mode d'emploi,* 244 p., 2009

et des dizaines d'autres livres de bricolage, de construction, d'architecture, de BTP et de génie civil sur www.editions-eyrolles.com